



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**DIMENSIONAMENTO DE UMA PASSARELA EM ESTRUTURA
METÁLICA NA CIDADE DE NOVO HAMBURGO / RS**

Laerti Graebin

Lajeado, julho de 2018.

Laerti Graebin

DIMENSIONAMENTO DE UMA PASSARELA EM ESTRUTURA METÁLICA NA CIDADE DE NOVO HAMBURGO / RS

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Etapa II, na linha de formação específica em Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Rebeca Jéssica Schmitz

Lajeado, julho de 2018.

Laerti Graebin

DIMENSIONAMENTO DE UMA PASSARELA EM ESTRUTURA METÁLICA NA CIDADE DE NOVO HAMBURGO / RS

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil:

Profa. Me. Rebeca Jéssica Schmitz –
orientadora
Universidade do Vale do Taquari

Prof. Me. Douglas Ferreira Velho
Universidade do Vale do Taquari

Profa. Dra. Emanuele Amanda Gauer
Universidade do Vale do Taquari

Lajeado, 10 de julho de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família por estar ao meu lado e torcer por mim, principalmente a minha mãe Glaci por todo apoio ao longo desta caminhada.

Agradeço a Profa. Rebeca Jéssica Schmitz, orientadora deste trabalho, pela confiança depositada em mim ao assumir a segunda etapa deste trabalho, pela atenção, dedicação e paciência ao longo do semestre.

Agradeço aos colegas da graduação, pela companhia durante o período de graduação, compartilhando os momentos difíceis e as conquistas.

Agradeço aos professores do curso, pelos conhecimentos transmitidos e pela amizade criada.

RESUMO

Este trabalho mostra uma proposta de dimensionamento de uma passarela em estrutura metálica, localizada no quilômetro 18 da Rodovia RS-239, na Cidade de Novo Hamburgo – RS. A estrutura tem como objetivo principal a redução do número de atropelamentos naquele local. A passarela deverá vencer um vão de 21 m, devido a rodovia possuir duas faixas de rolamento em ambos os sentidos. O modelo apresentado é de treliças planas. Inicialmente foram propostos dois perfis metálicos para a construção, depois a estrutura foi lançada no *software* Ftool para obtenção dos esforços axiais atuantes, em seguida foram verificados os percentuais necessários para atender aos esforços de tração e compressão. Para um dimensionamento mais refinado, a estrutura foi lançada no *software* ANSYS para verificação quanto aos estados limites últimos e estado limite de serviço, com análise das deformações máximas obtidas. A estrutura analisada demonstrou atender aos critérios de segurança e conforto dos pedestres, pois o percentual máximo necessário para resistir aos esforços de compressão ficou em 88,5% e de tração obteve-se o máximo de 33,81%.

Palavras-chave: Passarela de Pedestres. Projeto Estrutural de Passarela Metálica. Segurança Viária.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagramas tensão x deformação dos aços com patamar de escoamento	18
Figura 2 – Diagrama tensão x deformação de material sem patamar de escoamento	19
Figura 3 – Ensaio de cisalhamento	21
Figura 4 – Tipos de perfis usuais para vigas.	24
Figura 5 – Treliça plana.....	25
Figura 6 – Tipos de equilíbrio: estável, instável e neutro respectivamente.	26
Figura 7 – Coluna e perfil de seção simples.....	27
Figura 8 – Ligação rígida e ligação rotulada.....	28
Figura 9 – Dimensionamento de rampas	30
Figura 10 – Elementos de segurança para escadas e rampas	31
Figura 11 – Vista superior da passarela.....	36
Figura 12 – Vista tridimensional da passarela.....	36
Figura 13 – Elementos AA e AL.	41
Figura 14 – Dimensões da treliça (m)	51
Figura 15 – Numeração utilizada nas barras da treliça	52
Figura 16 – Modelo estrutural lançado no <i>software</i> Ftool.....	52
Figura 17 – Forças axiais atuantes na treliça (kN)	52
Figura 18 – Elemento <i>beam188</i>	55
Figura 19 – Modelo de elementos finitos (a) e seções transversais dos perfis (b)	56
Figura 20 – Forças axiais no eixo X para a malha 0,5 m	57
Figura 21 – Forças axiais no eixo X para a malha 0,3 m	57

Figura 22 – Deslocamentos no eixo Y para a malha 0,5 m	57
Figura 23 – Deslocamentos no eixo Y para a malha 0,3 m	58
Figura 24 – Momento fletor da combinação 11	59
Figura 25 – Momento fletor da combinação 12	60
Figura 26 – Momento fletor da combinação 13	60
Figura 27 – Esforços axiais da combinação 11 (kN)	61
Figura 28 – Esforços axiais da combinação 12 (kN)	61
Figura 29 – Esforços axiais da combinação 13 (kN)	61
Figura 30 – Deslocamento horizontal da estrutura em perspectiva (m)	62
Figura 31 – Esforços axiais na combinação 14 (kN)	63
Figura 32 – Deslocamento da estrutura para o ELS quase permanente (m)	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ISF	Instruções de Serviços Ferroviários
NBR	Norma Brasileira
TCC	Trabalho de conclusão de curso
cm	Centímetro
°C	Graus Celsius
m	Metro
m ²	Metros quadrados
m ³	Metros cúbicos
m/s	Metros por segundo
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
N	Newton
kN	KiloNewton

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Justificativa e relevância da pesquisa.....	13
1.2 Objetivo geral	14
1.3 Objetivos específicos.....	14
1.4 Pressupostos.....	14
1.5 Delimitação do trabalho.....	15
1.6 Limitações.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Classificação dos aços estruturais	16
2.1.1 Aços-carbono	16
2.1.2 Aços de baixa liga	16
2.1.3 Aços com tratamento térmico	17
2.2 Tensões e deformações.....	17
2.2.1 Tração.....	18
2.2.2 Compressão.....	20
2.2.3 Cisalhamento	20
2.3 Propriedades dos aços estruturais	21
2.3.1 Ductilidade	21
2.3.2 Fragilidade	22
2.3.3 Resiliência e tenacidade	22
2.3.4 Dureza	22
2.3.5 Fadiga.....	22

2.3.6 Corrosão	23
2.4 Classificação das peças	23
2.4.1 Folhas.....	23
2.4.3 Barras	24
2.4.4 Vigas.....	24
2.4.5 Pilares.....	24
2.5 Conceito de estrutura	25
2.5.1 Treliza plana	25
2.5.2 Deformações.....	25
2.5.3 Equilíbrio.....	26
2.5.4 Flambagem	26
2.5.5 Carregamento horizontal e carregamento vertical.....	27
2.5.6 Comportamentos das ligações	27
2.6 Passarelas.....	28
2.6.1 Considerações de dimensionamento	29
2.7 Projeto arquitetônico	32
2.7.1 Localização da passarela	32
2.7.2 Extensão e vãos a vencer	32
2.7.3 Estética.....	33
2.7.4 Cobertura	33
2.7.5 Revestimento.....	33
 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	 34
3.1 Pré-projeto	34
3.1.1 Determinação dos vãos	34
3.1.2 Largura da passarela	34
3.1.3 Acessos.....	35
3.1.4 Carregamento permanente.....	37
3.1.5 Carregamento variável de uso	37
3.1.6 Cargas devidas ao vento	37
3.1.7 Carga horizontal excepcional.....	38
3.2 Cálculos das resistências.....	38
3.2.1 Resistência à tração.....	39

3.2.2 Resistência à compressão	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1 Projeto estrutural	46
4.2 Ações permanentes	46
4.3 Ações variáveis	47
4.4 Combinações de cargas	48
4.4.1 Combinações últimas normais	49
4.4.2 Combinação última excepcional	49
4.4.3 Combinações quase permanentes de serviço	50
4.5 Análise no <i>software</i> Ftool	50
4.5.1 Dimensionamento à tração	52
4.5.2 Dimensionamento à compressão	53
4.6 Modelagem no <i>software</i> ANSYS	54
4.6.1 Sobre o modelo	54
4.6.2 Breve estudo de malha	56
4.6.3 Combinações de ações	58
4.7 Resultados da análise no <i>software</i> ANSYS	59
4.7.1 ELU normal	59
4.7.2 ELU excepcional	62
4.7.3 ELS quase permanente	63
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
REFERÊNCIAS	67
APÊNDICES	70

1 INTRODUÇÃO

O aumento da população e desenvolvimento das cidades resultam, entre outros, em um número crescente de veículos circulando pelas ruas. Isto pode prejudicar o trânsito dos pedestres, fazendo-se necessárias medidas que propiciem uma locomoção segura para quem anda a pé. Desta forma, torna-se muito importante a elaboração de vias exclusivas com o intuito de assegurar o fluxo dos pedestres, separando do trânsito de veículos (VASCONCELOS, 1993).

Neste contexto, está o quilômetro 18 da Rodovia RS-239, na cidade de Novo Hamburgo, trecho localizado entre grandes indústrias do setor calçadista, que abrigam um número expressivo de funcionários. Conforme Jornal NH (2017), o local conta com uma faixa de segurança para que os pedestres efetuem a travessia, porém não tem sido eficiente, visto que no ano de 2016 aconteceram 12 atropelamentos fatais, e no primeiro semestre de 2017 foram mais cinco atropelamentos fatais, seja por questões de má visibilidade, ou pela via ser de trânsito rápido, que pode dificultar a parada dos veículos.

O projeto de uma passarela deve levar em conta o conforto no deslocamento dos pedestres. Um bom projeto pode determinar que a passarela seja construída num local onde a maioria dos pedestres almeja fazer a travessia. A posição da passarela proposta neste trabalho é no mesmo ponto onde existe a faixa de pedestres, pois está localizada entre duas grandes indústrias. Para incentivar o uso da passarela pode-se colocar muros, grades, ou outro elemento que direcione os transeuntes para a passarela. Esses elementos tendem a diminuir a possibilidade de que o pedestre efetue a travessia na pista (ROSENBLUM 2009).

Com o intuito de proporcionar um bom entendimento do estudo efetuado, este trabalho foi dividido em 4 capítulos. Nesse capítulo inicial é mostrada uma rápida introdução sobre o assunto desenvolvido, bem como as diretrizes da pesquisa, com a justificativa, os objetivos, os pressupostos e a delimitação deste trabalho de conclusão de curso.

O capítulo 2 é fruto de revisão bibliográfica, que fornece o embasamento teórico para a realização da segunda etapa deste TCC. O capítulo aborda os principais tipos de aço estrutural, alguns exemplos de deformações causadas pelos carregamentos aplicados, as principais propriedades dos aços estruturais e algumas considerações sobre o dimensionamento de passarelas.

No capítulo 3 é mostrado um pré-projeto que considera basicamente a altura e os vãos a vencer, mostrando alguns conceitos gerais das normas brasileiras que devem ser obedecidos durante a realização de um projeto de passarela. Este capítulo aborda as equações e as verificações necessárias, para permitir a determinação dos carregamentos, a verificação das solicitações e o dimensionamento adequado da estrutura.

O capítulo 4 apresenta as ações consideradas no dimensionamento, as combinações de cargas aplicadas, os resultados obtidos através dos *softwares* Ftool e ANSYS com comentários acerca de cada resultado obtido.

No capítulo 5 estão algumas considerações sobre este trabalho, envolvendo a contextualização do tema, os objetivos propostos, a análise realizada em cada *software* com a verificação dos resultados e algumas sugestões para um novo trabalho ou possível continuidade deste.

1.1 Justificativa e relevância da pesquisa

Anualmente a Rodovia RS-239 vem registrando muitos casos de atropelamento com vítimas fatais. Esta faz a ligação entre Novo Hamburgo, no Vale dos Sinos, a Riozinho, no Vale do Paranhana. O trecho onde foi registrado um maior número de atropelamentos com mortes entre 2014 e 2017 fica na cidade de Novo Hamburgo, na altura do quilômetro 18, de acordo com Jornal NH (2017).

Ultimamente, vem surgindo propostas de possíveis soluções para o problema dos pedestres que transitam naquela via, sendo que há também crescimento no número de veículos que ali transitam. Como sugestão para evitar acidentes, este trabalho traz o projeto de uma passarela para que os transeuntes possam fazer a travessia de forma segura.

1.2 Objetivo geral

O objetivo principal é dimensionar uma passarela para pedestres de forma adequada e segura.

1.3 Objetivos específicos

Os objetos específicos são:

- a) definir a concepção estrutural da passarela;
- b) obter um modelo simplificado da estrutura (Ftool);
- c) definir diretrizes para o dimensionamento da passarela;
- d) construir um modelo em elementos finitos.

1.4 Pressupostos

Como pressupostos foi considerado:

- a) que uma passarela em treliças planas é um modelo estrutural adequado para a situação apresentada;
- b) que são acatadas como verdadeiras e válidas as informações constantes nos seguintes documentos:
 - ABNT NBR 7188/2013 – Carga Móvel em Pontes Rodoviárias e Passarelas de Pedestres;
 - ABNT NBR 6123/1988 – Forças Devidas ao Vento em Edificações;
 - ABNT NBR 8800/2008 – Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios;

- ABNT NBR 9050/2015 – Acessibilidade a Edificações, Mobiliário, Espaços e Equipamentos Urbanos.

1.5 Delimitação do trabalho

Este trabalho está delimitado ao projeto de uma passarela em estrutura metálica, para a travessia da Rodovia RS-239 na cidade de Novo Hamburgo, altura do Km 18. Será analisado um modelo geométrico e as seções dos elementos principais da estrutura da passarela.

1.6 Limitações

O trabalho limita-se a uma análise estática. Foram verificados somente os perfis principais da estrutura de travessia. A passarela não foi verificada quanto à vibração, também não foi dimensionado nenhum elemento de ligação, bem como não foi realizada composição de orçamentos da estrutura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Classificação dos aços estruturais

O aço é um material composto por 98% de ferro, contendo pequenas quantidades de carbono, enxofre, fósforo, silício, manganês, dentre outros. O carbono tem grande importância nas propriedades do aço, pois apresenta alta resistência mecânica e ductilidade. Os aços estruturais dividem-se em dois grupos: aços-carbono e aços de baixa liga (BELLEI, 2010).

2.1.1 Aços-carbono

De acordo com Chiaverini (2008) o aço-carbono é o mais usual, onde o incremento da resistência em relação ao ferro puro deve-se ao carbono e pequena adição de manganês. Para garantir boa soldabilidade utiliza-se um teor de carbono de no máximo 0,45%, acima deste há um aumento na resistência reduzindo a ductilidade, o que resulta num aço mais quebradiço e minora sua soldabilidade. Os aços-carbono mais usados em estruturas são: o ASTM A36 e A570.

2.1.2 Aços de baixa liga

O aço de baixa liga é o aço-carbono com pequenas adições de elementos de liga, como cobre, manganês, nióbio ou silício. Tais elementos permitem um aumento na resistência do aço devido à alteração da microestrutura para grãos menores. Desta forma, pode-se obter elevada resistência com teores de carbono em torno de

0,20%, garantindo assim boa soldabilidade. Com estas características alguns dos aços mais usuais são o ASTM A572 e o A441 (BELLEI, 2010).

Para obter um aço de baixa liga com alta resistência mecânica e muito resistente à corrosão atmosférica é feita uma pequena variação em sua composição química com adições de cobre, cromo, alumínio, nióbio ou níquel. Com estas variações os aços de baixa liga podem ter sua resistência à corrosão aumentada de duas a quatro vezes. São conhecidos como aços patináveis, onde podemos citar o ASTM A588. Para Dias (2006) este aço é muito utilizado no Brasil devido à sua resistência elevada e à possibilidade de soldagens sem preocupações especiais.

2.1.3 Aços com tratamento térmico

Conforme Silva e Mei (2006), tanto os aços-carbono quanto os de baixa liga possibilitam o aumento de suas resistências pelo tratamento térmico. Entretanto, a soldagem dos aços com tratamento térmico é mais difícil, tornando seu uso reduzido nas estruturas em geral.

2.2 Tensões e deformações

Em aplicações estruturais, as grandezas mais utilizadas são as tensões (σ) e as deformações (ε). De acordo com Souza (1982) para obter a tensão normal (σ), divide-se a força (F) aplicada na direção do eixo de uma peça pela área (A) da seção transversal, mostrada na Equação 1, e para encontrar o valor da deformação de determinado elemento usa-se a relação da variação do comprimento (Δl) sobre o comprimento inicial (l_0), conforme Equação 2.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

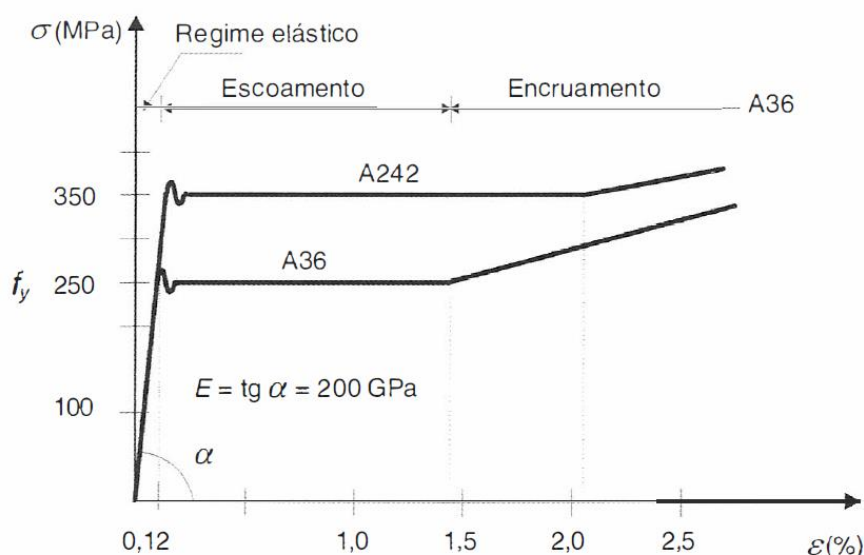
Dentro do regime elástico as tensões são proporcionais às deformações. O coeficiente de proporcionalidade (E), conhecido também como módulo de elasticidade é idêntico para todos os tipos de aço, variando entre 200.000 e 210.000 MPa (PFEIL; PFEIL, 2008).

2.2.1 Tração

O ensaio de tração é muito usado para medir as propriedades mecânicas dos aços. Este ensaio consiste em prender uma peça entre duas hastes metálicas com garras especiais, e aplicar valores crescentes de esforços de tração, analisando em cada estágio de carga o alongamento da peça (SOUZA, 1982).

Para Pfeil e Pfeil (2008), quando uma barra é submetida à tração, sua seção transversal diminui, permitindo assim calcular a tensão em cada estágio, desta forma obtém-se um diagrama tensão-deformação que mostra o comportamento do aço. Na Figura 1 são apresentados os diagramas correspondentes aos aços A36 e A242, que são os mais usuais nas construções.

Figura 1 – Diagramas tensão x deformação dos aços com patamar de escoamento



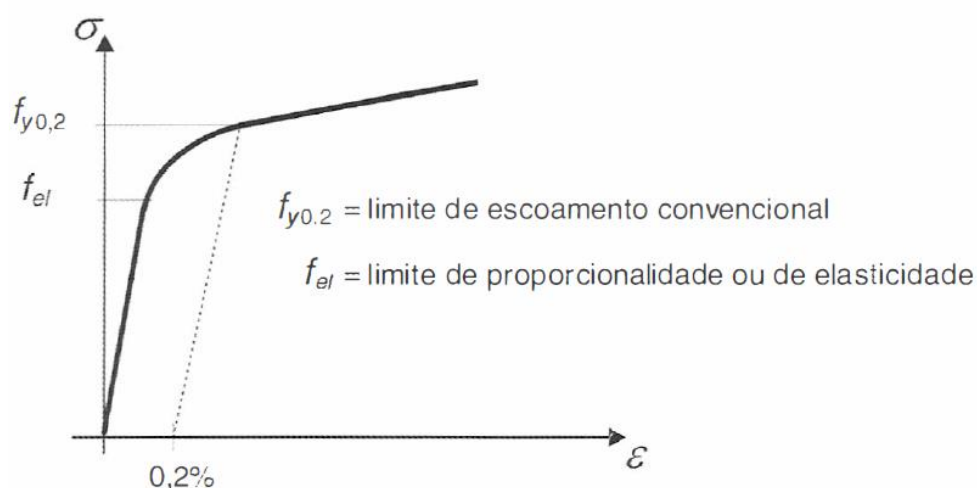
Fonte: Pfeil e Pfeil (2008, p. 14).

Conforme Dias (2006) a inclinação do trecho retilíneo dos diagramas é o módulo de elasticidade. Ultrapassando o regime elástico, acontece o aumento da deformação com tensão constante, chamado de escoamento. Esta tensão chama-se limite de escoamento (f_y) do material. Para deformações superiores ao patamar de escoamento, os materiais apresentam acréscimo de tensões, conhecidas como encruamento. Porém não é utilizado nos cálculos, pois tal acréscimo é caracterizado por deformações exageradas.

O escoamento gera uma deformação visível nas peças metálicas, desta forma, a teoria elástica de dimensionamento usa o limite de escoamento como tensão limite, e desta obtém-se a tensão admissível como um coeficiente de segurança adequado. A teoria plástica calcula o estado limite na faixa de escoamento real (DIAS, 2006).

Existem aços que não apresentam patamar de escoamento bem definido, como o A325 e A490. De acordo com Pfeil e Pfeil (2008) nessas situações, é estabelecido um limite arbitrário de deformação, conhecido como limite de escoamento convencional, e é usado nos cálculos da mesma maneira que o limite de escoamento real dos aços com patamar de escoamento.

Figura 2 – Diagrama tensão x deformação de material sem patamar de escoamento



Fonte: Pfeil e Pfeil (2008, p. 15).

Quando é interrompido o ensaio de tração numa barra, o descarregamento no diagrama segue uma linha paralela à curva de carregamento na origem, o que resulta em uma deformação permanente. A tensão que corresponde a uma deformação permanente de 0,2% é denominada limite de escoamento convencional.

2.2.2 Compressão

O ensaio de compressão não é muito utilizado nos metais, devido a algumas dificuldades como o atrito entre o corpo de prova e a superfície da máquina, flambagem e a variação das condições nos ensaios que dependem se o metal é dúctil ou frágil. Conforme Souza (1982) um corpo de prova cilíndrico, de um metal dúctil só pode ter sua resistência determinada com precisão na zona elástica, pois quando alcança o regime plástico o material tende a aumentar seu diâmetro e diminuir seu comprimento, achatando-se até ficar como um disco.

2.2.3 Cisalhamento

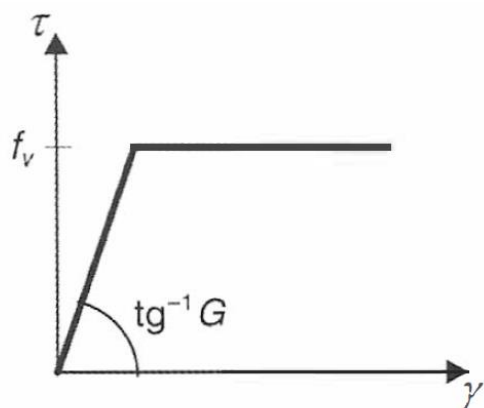
O ensaio de cisalhamento gera um diagrama semelhante ao de tensão x deformação, conforme Figura 3, e é definido pela tensão cisalhante τ x distorção γ . Para Pfeil e Pfeil (2008) a inclinação do diagrama é conhecida como módulo de cisalhamento G , e é definida pela Equação 3. A tensão de escoamento a cisalhamento (f_v) é proporcional à tensão de escoamento a tração (f_y) e pode ser obtida com a Equação 4.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3)$$

$$f_v = 0,6f_y \quad (4)$$

Onde ν = coeficiente de deformação transversal. Para o aço com $\nu = 0,3$, o módulo de cisalhamento G fica em 77.000 MPa (PFEIL e PFEIL, 2008).

Figura 3 – Ensaio de cisalhamento



Fonte: Pfeil e Pfeil (2008, p. 15).

2.3 Propriedades dos aços estruturais

Segundo a NBR 7007 (ABNT, 2016), os aços podem ser classificados em categorias, designadas conforme o limite de escoamento f_y , aqui estão alguns exemplos:

- a) ASTM A36 – aço de média resistência ($f_y = 250 \text{ Mpa}$; $f_u = 400 \text{ Mpa}$);
- b) AR350 – aço de alta resistência ($f_y = 350 \text{ Mpa}$; $f_u = 450 \text{ Mpa}$);
- c) AR-COR415 – aço de alta resistência ($f_y = 415 \text{ Mpa}$; $f_u = 520 \text{ Mpa}$) resistente à corrosão.

2.3.1 Ductilidade

De acordo com Dias (2006) ductilidade é a capacidade de deformação plástica dos materiais sem se romper. Os aços dúcteis, sob tensões locais elevadas, sofrem deformações plásticas que podem redistribuir as tensões. Esta capacidade permite considerar distribuição uniforme da carga entre parafusos numa ligação parafusada. A ductilidade pode ser aferida pela deformação unitária residual após a ruptura do material.

2.3.2 Fragilidade

Os aços podem se tornar frágeis por conta de diversos agentes, como baixas temperaturas ambientes ou efeitos térmicos causados por solda elétrica. As análises das condições em que os aços tornam-se frágeis é de suma importância nas estruturas metálicas, devido aos materiais frágeis romperem bruscamente, podendo ocasionar acidentes oriundos dos procedimentos inadequados de solda. A fragilidade de um material é analisada em dois aspectos: iniciação da fratura e sua propagação, que ocorre quando uma tensão ou deformação unitária aumenta num ponto onde o material perdeu ductilidade (PFEIL e PFEIL, 2008).

2.3.3 Resiliência e tenacidade

Estas propriedades estão relacionadas com a capacidade do material de absorver energia mecânica. Conforme Dias (2006) resiliência é a capacidade de absorção de energia mecânica em regime elástico, desta forma, equivale à capacidade de restituir a energia mecânica absorvida. Tenacidade é o total de energia elástica e plástica que o material pode absorver até a sua ruptura.

2.3.4 Dureza

Dureza é a resistência ao risco ou abrasão. É medida através da resistência que a superfície do material apresenta à penetração de uma peça de maior dureza, onde o ensaio caracteriza-se pela compressão de uma esfera de aço sobre uma superfície plana (SOUZA, 1982).

2.3.5 Fadiga

A fadiga é um efeito que ocorre quando os elementos metálicos trabalham sob efeito de esforços repetidos e em número elevado, no qual pode existir ruptura em tensões inferiores às obtidas em ensaios estáticos. Segundo Pfeil e Pfeil (2008)

a resistência à fadiga é determinante no dimensionamento de elementos sob ação de efeitos dinâmicos, e também é bastante reduzida nos pontos de concentração de tensões, oriundas de variações na forma da seção, ou por modificações na estrutura cristalina do aço, devidas às uniões por solda. A fadiga caracteriza-se pelo aparecimento de fraturas que aumentam com a repetição do carregamento.

2.3.6 Corrosão

A corrosão é o processo de reação do aço com elementos presentes no ambiente em que ele está exposto. A corrosão causa a diminuição de seção das peças de aço, podendo levar ao colapso. Para a proteção contra a corrosão os dois métodos mais empregados são a pintura e a galvanização. A pintura é aplicada em toda a superfície do aço a fim de protegê-lo contra a corrosão causada pelo meio onde ficará exposta, para garantir sua vida útil. Já a galvanização é um processo em que o aço é recoberto por uma camada de zinco metálico, funciona como um revestimento de grande resistência à corrosão, devido as propriedades de proteção catódica do zinco (DIAS, 2006).

2.4 Classificação das peças

Conforme Wilei (2009) os elementos estruturais podem ser classificados de acordo com suas dimensões.

2.4.1 Folhas

As folhas possuem função de piso, fechamento lateral ou cobertura. Caracterizam-se por ter uma das dimensões muito menor a das outras duas (WILEY, 2009).

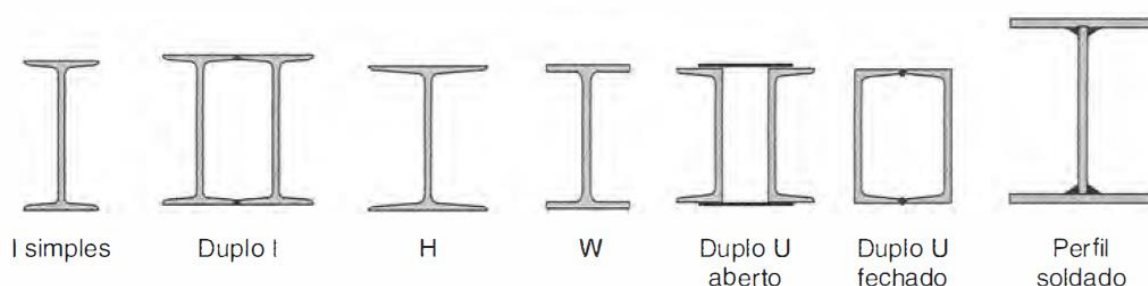
2.4.2 Barras

Para Dias (2006), as barras são elementos que possuem uma das dimensões muito elevada em relação as outras. Como exemplo citam-se as vigas e pilares. Este tipo de peça pode ser subdividido em barras sólidas ou de paredes delgadas, onde a primeira geralmente compreende peças em concreto e a última envolve barras metálicas.

2.4.3 Vigas

As vigas geralmente sofrem carregamentos transversais ao seu eixo. Em vigas submetidas à flexão simples, nas seções críticas calcula-se o momento e o esforço cortante resistente de projeto, para fazer comparações aos esforços solicitantes. Os modelos de seções transversais mais adequados para os esforços à flexão, de acordo com Pfeil e Pfeil (2008) são os que possuem as áreas mais distantes do eixo neutro. Desta forma, pode-se utilizar duas chapas, juntando-as por uma chapa fina, formando assim uma viga I, conforme Figura 4.

Figura 4 – Tipos de perfis usuais para vigas.



Fonte: adaptado de Pfeil e Pfeil (2008, p. 154).

2.4.4 Pilares

Os pilares são elementos estruturais rígidos e relativamente esbeltos, cuja função principal é suportar carregamentos axiais de compressão. Segundo Wilei (2009), quando um pilar sofre uma carga excêntrica, esta cria um certo momento de

flexão, que causa uma distribuição de tensões desigual em sua seção. Quando é dimensionado um pilar, deve-se analisar as tensões que estão incidindo sobre ele, buscando valores adequados para o raio de giro da seção transversal, bem como para a esbeltez da peça.

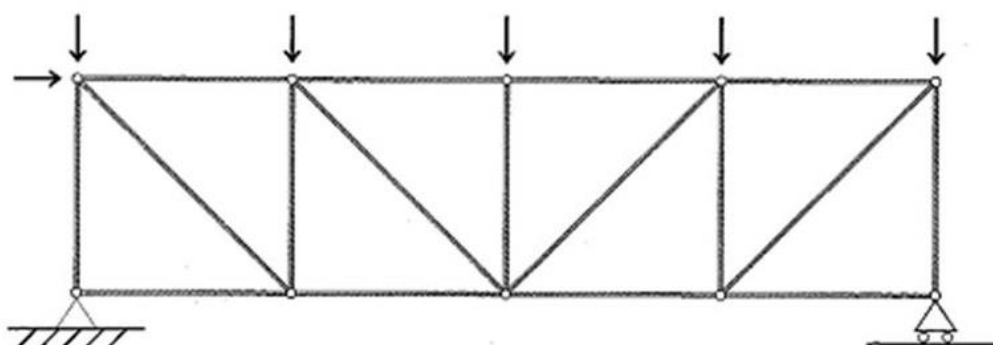
2.5 Conceito de estrutura

Estrutura é o elemento ou conjunto destes em uma construção com o intuito de resistir a cargas. Segundo Dias (2006), cada peça estrutural da construção deve resistir às cargas nela aplicadas e transmiti-las por meio dos vínculos que as unem, a fim de conduzi-las ao solo.

2.5.1 Treliça plana

Conforme Dias (2006), um tipo importante de estrutura é o da treliça plana, a qual é formada por barras coplanares articuladas entre si e sujeitas a carregamentos nodais, e pode ser visualizada na Figura 5.

Figura 5 – Treliça plana



Fonte: Dias (2006, p. 42).

2.5.2 Deformações

As barras das estruturas em geral diferem-se uma das outras quanto ao tipo de deformação a que estão submetidas. Deformação pode ser definida como a mudança de forma de um elemento, onde ocorre a condução de seus pontos por

conta da aplicação do carregamento. As barras de uma treliça plana apresentam somente deformações axiais (DIAS, 2006).

2.5.3 Equilíbrio

A estabilidade dos tipos de equilíbrio de uma barra pode ser analisada através da teoria de investigação da estabilidade de equilíbrio de sistemas de corpo rígido. As estruturas como um todo devem estar em equilíbrio, a resultante das forças aplicadas sobre um elemento deve ser nula, bem como os momentos provocados por estas forças. Conforme Peres (2011), pode-se classificar as situações de equilíbrio de três maneiras: equilíbrio estável, equilíbrio instável e equilíbrio neutro, de acordo com a Figura 6.

Figura 6 – Tipos de equilíbrio: estável, instável e neutro respectivamente.



Fonte: Peres (2011, p. 68).

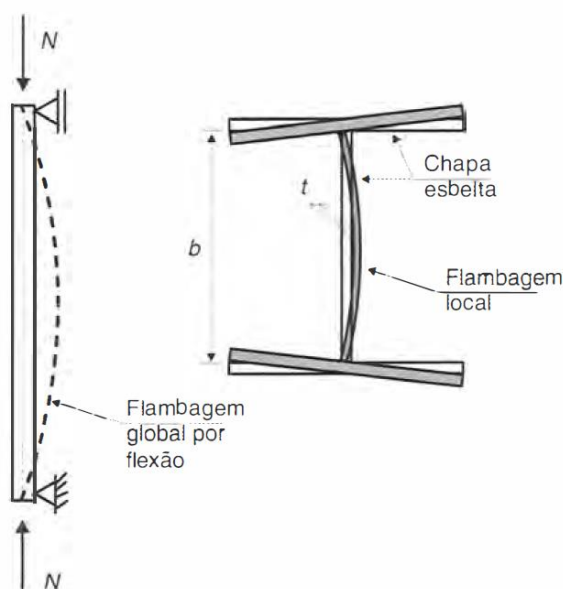
Para descobrir o tipo de equilíbrio ao qual um corpo está submetido aplica-se uma força de baixa intensidade, retirando-a e em seguida observando a nova posição do corpo. Se na segunda etapa a posição de equilíbrio do corpo é a mesma do início, então está em equilíbrio estável. De acordo com Dias (2006) estando a posição de equilíbrio muito distante da inicial chama-se equilíbrio instável e quando a posição de equilíbrio do corpo muda conforme a intensidade da força aplicada, pode-se dizer que ele está em equilíbrio neutro.

2.5.4 Flambagem

O esforço de compressão pode causar um efeito de curvatura nas peças. Os deslocamentos laterais que ocorrem são conhecidos como flambagem por flexão, que geralmente diminui a capacidade de carga do elemento. As partes de um perfil comprimido podem sofrer flambagem local, que se caracteriza como uma

instabilidade devida aos deslocamentos transversais à chapa. O aparecimento de flambagem local vai depender da esbeltez da chapa (PFEIL; PFEIL, 2008).

Figura 7 – Coluna e perfil de seção simples



Fonte: adaptado de Pfeil e Pfeil (2008, p. 119).

2.5.5 Carregamento horizontal e carregamento vertical

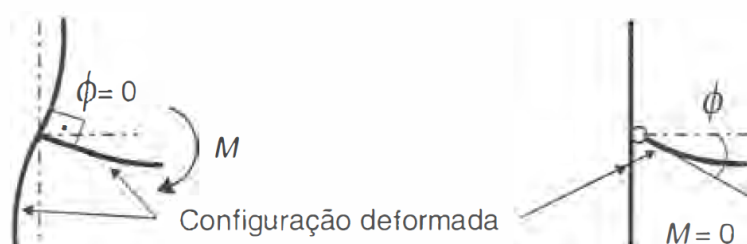
O carregamento horizontal pode ser dividido em transversal e longitudinal. Os pilares atuam como vigas apoiadas/engastadas nas fundações, e devem ser dimensionados para resistir aos esforços do vento, que geram momentos fletores. As forças longitudinais do vento atuam sobre as faces da seção longitudinal do objeto submetido à análise. De acordo com Dias (2006) o vento pode atuar no sentido contrário em ambas as direções, mas não simultaneamente. O carregamento vertical, formado basicamente pelas ações relativas ao uso, sobrecarga e peso próprio das estruturas de aço, é transmitido das lajes para as vigas, em seguida aos pilares e depois às fundações.

2.5.6 Comportamentos das ligações

Para o funcionamento adequado das estruturas de aço, deve-se conhecer o comportamento das ligações, pois são as uniões entre elementos da estrutura que

irão determinar o esquema estrutural dos pórticos. Na Figura 8 podem ser visualizados dois modelos ideais de comportamento das ligações: ligação rígida, que impede a rotação; e ligação rotulada, que permite a rotação (PFEIL; PFEIL, 2008).

Figura 8 – Ligação rígida e ligação rotulada.



Fonte: adaptado de Pfeil e Pfeil (2008, p. 27).

2.6 Passarelas

De acordo com o Código de Trânsito Brasileiro (1997), passarela é uma obra de arte com a função de cruzar vias, em desnível aéreo, e para o uso de pedestres. Já para a NBR 7188 (ABNT, 2013) passarela é uma estrutura longilínea, e serve para transpor obstáculos artificiais ou naturais exclusivamente para pedestres e ciclistas.

Uma passarela rodoviária é uma espécie de ponte exclusiva para pedestres construída sobre uma via de trânsito rápido, com o intuito de separar fisicamente o trânsito de pedestres e de veículos, reduzindo quaisquer conflitos entre os mesmos. Por serem de uso público, as passarelas necessitam ser duráveis e bonitas. Conforme Rosenblum (2009), espera-se de uma passarela que possibilite a passagem e garanta uma travessia com segurança.

De acordo com a NBR 9050 (ABNT, 2015) as passarelas de pedestres podem ter seu acesso por somente rampas, escadas e rampas, escadas e elevadores ou rampas e elevadores para sua travessia, sendo que todas estas formas devem atender os aspectos de acessibilidade.

2.6.1 Considerações de dimensionamento

Uma das primeiras cargas a considerar num dimensionamento é a carga permanente da estrutura. No caso de passarelas, além do peso próprio, esta carga também leva em consideração elementos que compõem toda a estrutura, como guarda-corpo, pavimentação, sinalização dentre outras.

Segundo a NBR 7188 (ABNT, 2013) as cargas móveis devem ser consideradas como cargas uniformemente distribuídas, colocadas na posição mais desfavorável. O valor estático da carga móvel uniformemente distribuída é adotado 5,0 kN/m².

2.6.1.1 Escada

Para o dimensionamento de escadas usam-se a NBR 9077 (ABNT, 2001) e NBR 9050 (ABNT, 2015). A largura mínima de escadas é definida pela NBR 9050 (ABNT, 2015) como 1,20 metros, e deve ser dimensionada de acordo com o fluxo de pessoas. Os espelhos (e) devem ter entre 16 e 18cm, e os pisos (p) de 28 a 32cm. O dimensionamento dos espelhos e pisos dos degraus deve obedecer à fórmula de Blondel, mostrada na Equação 5:

$$63cm \leq p + 2e \leq 64cm \quad (5)$$

Onde:

p = profundidade do piso;

e = espelho do degrau.

As escadas devem ter pelo menos um patamar a cada 3,20 metros de desnível e também nas mudanças de direção. Os patamares situados nas mudanças de direção necessitam que suas dimensões sejam iguais à largura da escada.

2.6.1.2 Rampa

A rampa é caracterizada pela NBR 9050 (ABNT, 2015) como uma superfície de piso com declividade igual ou maior que 5%. Para garantir a acessibilidade em uma rampa, é estabelecido um limite máximo de inclinação, que pode ser calculado através da Equação 6, e um exemplo desta na Figura 9.

$$i = \frac{h \times 100}{c} \quad (6)$$

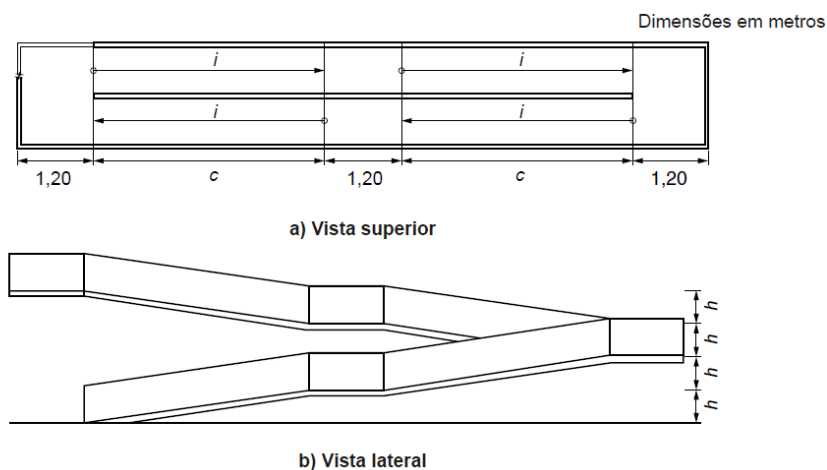
Onde:

i = inclinação, expressa em porcentagem (%);

h = altura do desnível;

c = comprimento da projeção horizontal.

Figura 9 – Dimensionamento de rampas



Fonte: adaptado de NBR 9050 (ABNT, 2015, p. 58).

Os limites de inclinação das rampas são conforme a Tabela 1:

Tabela 1 – Dimensionamento de rampas

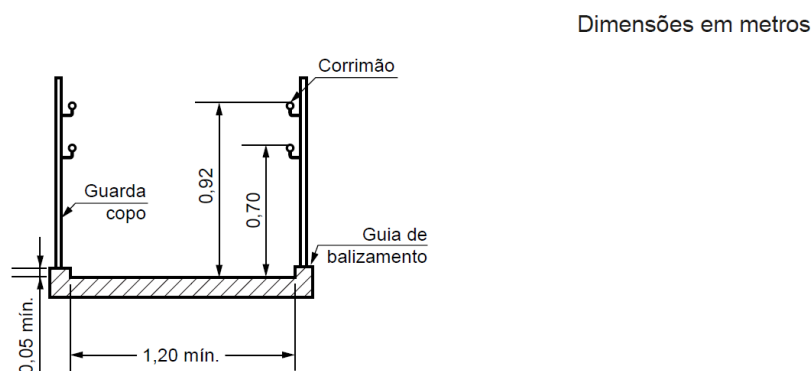
Desníveis máximos de cada segmento de rampa h (m)	Inclinação admissível em cada segmento de rampa i (%)	Número máximo de segmentos de rampa
1,50	5,00 (1:20)	Sem limite
1,00	$5,00 (1:20) < i \leq 6,25 (1:16)$	Sem limite
0,80	$6,25 (1:16) < i \leq 8,33 (1:12)$	15

Fonte: NBR 9050 (ABNT, 2015, p. 59).

2.6.1.3 Corrimão e Guarda-Corpo

Em escadas e rampas onde não existam paredes laterais, devem ser previstos elementos de segurança, como corrimãos, guarda-corpos e guias de balizamento. A NBR 9050 (ABNT, 2015) mostra que os corrimãos podem ser instalados dentro da largura mínima admissível das escadas e rampas em até 10 cm de cada lado, devem ter altura mínima de 92 cm e necessitam ser fixados firmemente às barras de suporte, para garantir a segurança na utilização. A guia de balizamento deve altura mínima de 5 cm, e também deve ser afixada em ambos os lados de escadas e rampas. Na Figura 10 podem ser visualizados os elementos de segurança.

Figura 10 – Elementos de segurança para escadas e rampas



Fonte: NBR 9050 (ABNT, 2015, p. 60).

Algumas especificações expressas na ISF 219 (DNIT, 2015b) trazem que a seção horizontal deve ter largura mínima de 2,00 m para permitir que os pedestres transitem simultaneamente em sentidos contrários. O guarda-corpo deve ter altura

mínima de 1,00 m, fixado ao vigamento principal do tabuleiro, de forma a assegurar resistência mínima ao impacto de 80 kgf contra o corrimão.

2.7 Projeto arquitetônico

Para o projeto arquitetônico devem ser usadas técnicas e teorias, para que atenda às necessidades da população da melhor maneira possível. Bellei (2010) traz que um projeto pode ser dividido em infraestrutura e superestrutura, sendo que esta última, depende de alguns fatores como topografia local, extensão e vãos a vencer, localização e tempo previsto para a execução.

A ISF 216 (DNIT, 2015a) recomenda alguns pontos fundamentais a serem considerados no projeto, como:

- a) localização adequada da passarela;
- b) garantia de conforto e segurança aos pedestres;
- c) atendimento das especificações contidas na ABNT NBR 9050.

2.7.1 Localização da passarela

A localização de uma passarela pode ser um fator determinante para a decisão de um pedestre em usá-la ou não. Portanto, deve ser considerada de suma importância a localização desta ao elaborar um projeto. De acordo com Abraspe (2000) muitos pedestres deixam de utilizar as passarelas para evitar possíveis assaltos e violência, desta forma, é aconselhável que próximo às passarelas existam comércios ou atividades culturais. Outro fator relevante é que onde há uma passarela implantada, os motoristas tendem a sentir certa segurança a mais, pois supõem que não surgirão pedestres atravessando a rodovia.

2.7.2 Extensão e vãos a vencer

Em um projeto de passarela a extensão e os vãos a vencer, bem como a largura de passagem dos pedestres e a altura livre para o trânsito dos veículos

devem ser determinados conforme sua utilização. Conforme Brasil (1996) altura livre mínima é de 5,50 metros.

O vão a ser vencido é determinado de acordo com a largura da rodovia, que no trecho onde será proposta a construção da passarela é duplicada, tendo cada lado da rodovia 7,00 metros de faixa de rolamento e um canteiro central de 2,50 metros, totalizando 16,50 metros (BRASIL, 1996).

2.7.3 Estética

A estética é bastante subjetiva, pois os critérios variam de acordo com a situação e quem está avaliando. As passarelas podem ser leves e resistentes, devido às pequenas cargas que estarão sujeitas. Mas segundo Abraspe (2000) deve-se ter cuidado com a esbeltez dos elementos, para que não traga desconforto ao pedestre, no sentido da segurança da estrutura. A ISF 219 (DNIT, 2015b) ressalta a importância de instalar iluminação nas passarelas, como uma forma de prevenir acidentes.

2.7.4 Cobertura

A cobertura de uma passarela também pode ser um atrativo para os pedestres. Abraspe (2000) diz que é muito bem-vinda a instalação de coberturas para proteção contra intempéries, auxiliando de certa forma a evitar possíveis fatores como a corrosão.

2.7.5 Revestimento

Os materiais de acabamento e revestimento devem ser firmes, estáveis e ter superfície regular, não trepidante, estando seco ou molhado, e o piso deve ser de material antiderrapante NBR 9050 (ABNT, 2015). Conforme Dias (2006) os métodos mais usados para proteção de estruturas metálicas são a pintura e a galvanização.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Pré-projeto

Neste tópico serão apresentadas as definições para o projeto da passarela proposta. O modelo estrutural escolhido para a passarela é o de treliças planas. Nos próximos itens serão descritos os métodos para cálculo dos componentes estruturais da passarela.

3.1.1 Determinação dos vãos

Conforme descrito no item 2.8.2, o local escolhido para a construção da passarela possui 16,50 m de vão a ser vencido. Portanto, para esta passarela será adotado um vão de 21,00 m. A altura livre será de 5,50 m, respeitando o limite estabelecido pelo DNIT (BRASIL, 1996).

3.1.2 Largura da passarela

A NBR 9050 (ABNT, 2015) recomenda que a largura das passarelas seja determinada de acordo com o volume de pedestres que poderão utilizá-las nos horários de pico, sendo que a largura mínima, de acordo com a ISF 219 (DNIT, 2015b) é de 2,00 m, será adotada para esta passarela a largura de 2,50 m.

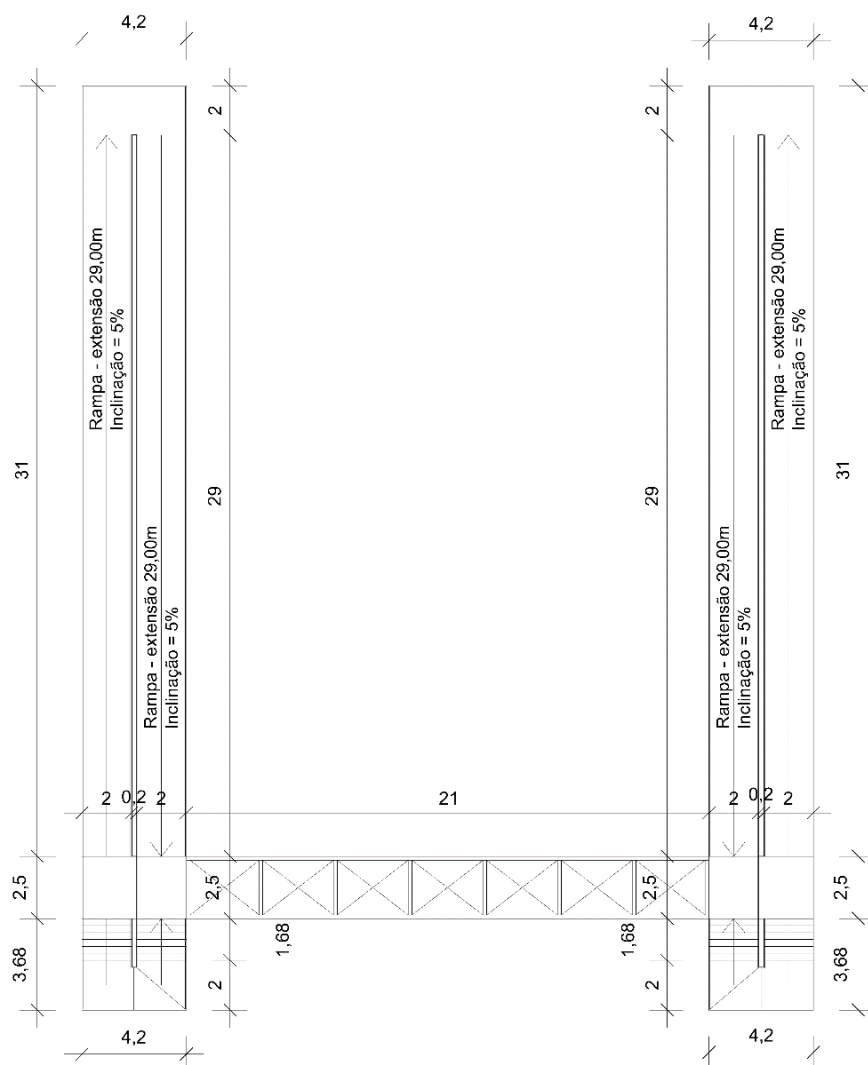
3.1.3 Acessos

Para acessar a passarela de forma rápida e segura, serão propostas para a construção duas formas de acesso: por escadas e também rampas. Desta forma, atenderá os critérios de acessibilidade, que estão descritos no item 2.7.

De início, serão consideradas que as vigas da parte inferior possuem 0,30 m de altura, que somado aos 5,50 m de vão livre totalizam 5,80 m. Para alcançar este patamar através de escadas, são necessários 32 degraus com 0,181 m de altura, e base de 0,28 m. A largura adotada para a escada será de 2,00 m. E para as rampas, serão necessários quatro segmentos de 29,00 m de comprimento, com inclinação de 5%, e largura de 2,00 m.

A passarela proposta foi desenhada em dois *softwares*, inicialmente no AutoCAD para lançamento das dimensões pré-estabelecidas e em seguida no SketchUp para criação de um modelo tridimensional, com o intuito de ilustrar de forma adequada o projeto. As Figuras 11 e 12 mostram uma vista superior e tridimensional da passarela, respectivamente.

Figura 11 – Vista superior da passarela



Fonte: do autor (2017).

Figura 12 – Vista tridimensional da passarela



Fonte: do autor (2017).

3.1.4 Carregamento permanente

O carregamento permanente possui valor constante durante a vida útil da obra. A NBR 7187 (ABNT, 2003) diz que a principal carga permanente a ser analisada é o peso próprio dos elementos que compõem a estrutura, bem como dos elementos não estruturais.

3.1.5 Carregamento variável de uso

Segundo a NBR 7187 (ABNT, 2003) o carregamento variável inclui ações com possíveis variações ao longo da vida útil da estrutura. Neles estão compreendidas as cargas móveis, as cargas de vento e também de temperatura. Neste trabalho serão consideradas apenas as cargas móveis e as de vento, que possuem maior influência sobre a passarela. De acordo com a NBR 7188 (ABNT, 2013) deve ser adotada uma carga uniformemente distribuída (p), aplicada no pavimento, entre os guarda-corpos, na posição menos favorável, de 5,0 kN/m².

3.1.6 Cargas devidas ao vento

As cargas devidas ao vento são consideradas em duas direções. A carga na direção y incide perpendicularmente no menor lado da passarela, atingindo as treliças e as vigas de ligação destas. A carga na direção x incide perpendicularmente no maior lado da passarela, atingindo os banzos e as treliças. Conforme a NBR 6123 (ABNT, 1988) os cálculos das forças do vento podem ser realizados utilizando as Equações 7 a 10.

$$F = C_f \times q \times A \quad (7)$$

$$q = c \times P_{din} \quad (8)$$

$$P_{din} = 0,613 \times V k^2 \quad (9)$$

$$V_k = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3 \quad (10)$$

Onde:

F = força de arrasto, em N;

C_f = coeficiente de força;

q = pressão dinâmica do vento ponderada, em N/m²;

c = coeficiente aerodinâmico;

A = área da face com vento incidente, em m²;

P_{din} = pressão dinâmica do vento, em N/m²;

V_k = velocidade característica do vento, em m/s;

V_0 = velocidade básica do vento, em m/s;

S_1 = fator topográfico;

S_2 = fator de rugosidade;

S_3 = fator estatístico.

3.1.7 Carga horizontal excepcional

Como forma de abrandar eventuais impactos, deve ser aplicada uma carga horizontal pontual de 100 kN no ponto menos favorável da estrutura no sentido do tráfego sob a passarela. Todos os vínculos devem ser dimensionados para esta ação excepcional NBR 7188 (ABNT, 2013).

3.2 Cálculos das resistências

Neste item serão apresentadas as bases para o dimensionamento da passarela. O método de cálculo é dos estados limites, cujo princípio é que nenhum limite aplicável pode ser excedido com a estrutura submetida a todas combinações

de ações. A NBR 8800 (ABNT, 2008) traz que os estados limites últimos estão relacionados com a segurança da estrutura, enquanto os estados limites de serviço estão relacionados com o desempenho da estrutura sob condições normais de serviço.

A NBR 8800 (ABNT, 2008) mostra algumas propriedades mecânicas dos aços estruturais que podem ser utilizadas nos cálculos, que são:

- a) módulo de Elasticidade (E) = 200.000 MPa;
- b) coeficiente de Poisson (ν) = 0,3;
- c) coeficiente de Dilatação Térmica (β) = $12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$;
- d) peso Específico (γ_g) = 78,5 kN/m³.

3.2.1 Resistência à tração

Para o cálculo de resistência de peças tracionadas, a NBR 8800 (ABNT, 2008) possui duas fórmulas para a força resistente de cálculo em barras com furos, conforme Equações 11 e 12, em que a força a ser adotada será a menor delas.

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g \times f_y}{1,1} \quad (11)$$

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e \times f_u}{1,35} \quad (12)$$

$$A_e = C_t \times A_n \quad (13)$$

Onde:

$N_{t,Rd}$ (Equação 11) = escoamento da seção bruta;

$N_{t,Rd}$ (Equação 12) = ruptura da seção líquida;

A_g = área bruta da seção;

f_y = tensão de escoamento do aço;

f_u = tensão resistente à tração do aço;

A_e = área líquida efetiva;

C_t = fator redutor aplicado a área líquida;

A_n = área líquida.

Para o cálculo do coeficiente de redução da área líquida (C_t), segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008) devem ser observadas algumas regras:

- a) se a força de tração for transferida diretamente para os elementos do perfil, por solda ou parafuso, usa-se $C_t = 1,0$;
- b) se a força de tração for transferida por parafusos ou soldas longitudinais, ou por uma combinação de soldas transversais e longitudinais, usa-se a Equação 14;
- c) se a força de tração for transferida somente por soldas transversais, usa-se a Equação 15.

$$C_t = 1 - \frac{ec}{lc} \quad (14)$$

$$C_t = 1 - \frac{Ac}{Ag} \quad (15)$$

Onde:

ec = excentricidade da ligação;

lc = comprimento do filete, em ligações soldadas, e distância do primeiro furo até o último furo na direção da força, em ligações parafusadas;

Ag = área bruta da seção transversal;

Ac = área da seção transversal dos elementos conectados.

Quanto ao índice de esbeltez das barras tracionadas, a NBR 8800 (ABNT, 2008) recomenda que este índice não supere o valor de 300. Para determiná-lo utiliza-se a Equação 16.

$$\lambda = \frac{l}{r} \leq 300 \quad (16)$$

Onde:

λ = índice de esbeltez;

l = comprimento destravado;

r = raio de giração correspondente.

3.2.2 Resistência à compressão

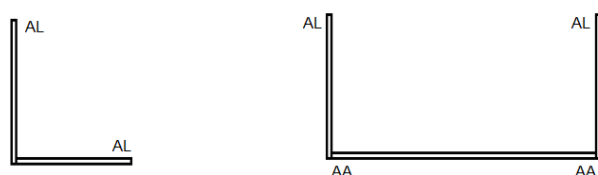
Uma barra comprimida pode entrar em colapso de três formas ou pela interação delas, que são:

- a) por escoamento;
- b) por flambagem local;
- c) por flambagem global.

De acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008) ocorrerá escoamento quando a tensão aplicada numa barra atingir a tensão de escoamento. O colapso por escoamento acontece em perfis muito curtos e com paredes muito espessas.

A flambagem local pode ocorrer em um ou mais elementos que formam o perfil. Ao ser comprimido, apresentará ondulações em seus elementos. Conforme a NBR 8800 (ABNT, 2008) os perfis geralmente são formados por dois ou três elementos. Elementos AA são ligados, em ambas as bordas, a outros elementos, que o enrijecerão. Elementos AL são ligados em apenas uma das bordas, a um outro elemento. A Figura 13 ilustra esta analogia.

Figura 13 – Elementos AA e AL.



Fonte: do autor (2017).

A NBR 8800 (ABNT, 2008) considera a flambagem local por meio de um fator de forma (Q), que reduz a resistência de cálculo dos perfis. As orientações para determinação do fator de forma são as seguintes:

- a) para elementos AL, $Q = Q_s$;
- b) para elementos AA, $Q = Q_a$;
- c) para os perfis mistos, $Q = Q_s \times Q_a$.

Para elementos (perfis I, U) pertencentes a perfis laminados, o Q_s calcula-se conforme Equações 17 ou 18:

$$Q_s = 1,415 - 0,74 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{fy}{E}}, \text{ para } 0,56 \sqrt{\frac{E}{fy}} < \frac{b}{t} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{fy}} \quad (17)$$

$$Q_s = \frac{0,69 E}{fy \left(\frac{b}{t}\right)^2}, \text{ para } \frac{b}{t} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{fy}} \quad (18)$$

Onde:

Q_s = fator de redução;

b = largura do elemento;

t = espessura do elemento;

fy = tensão de escoamento do aço;

E = módulo de elasticidade.

O fator de redução Q_a é definido conforme a Equação 19:

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} \quad (19)$$

$$A_{ef} = A_g - \Sigma(b - be_f)t \quad (20)$$

$$b_{ef} = 1,91t \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \left[1 - \frac{0,34}{b/t} \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right] \leq b \quad (21)$$

Onde:

Q_a = fator de redução;

A_{ef} = área efetiva da seção transversal;

A_g = área bruta;

b_{ef} = largura efetiva de um elemento comprimido AA.

σ = tensão que pode atuar no elemento analisado, tomando igual a $\sigma = f_y$.

A flambagem global pode acontecer de três formas:

- a) flambagem por flexão;
- b) flambagem por torção;
- c) flambagem por flexo-torção.

A flambagem por flexão ocorre em torno do eixo que tiver o menor raio de giro. Pode ocorrer em perfis duplamente simétricos ou de seção cheia. A NBR 8800 (ABNT, 2008) diz que este tipo de flambagem é caracterizado por apresentar a deformada do perfil idêntica a deformada de um elemento fletido.

A flambagem por torção ocorre em perfis duplamente simétricos em forma de cruz. Caracteriza-se por apenas rotar o perfil, mantendo seu eixo na posição original.

Ainda conforme a NBR 8800 (ABNT, 2008) a flambagem por flexo-torção com apenas um ou nenhum eixo de simetria. O perfil que sofre esta flambagem comporta-se como se sofresse uma flambagem por flexão, transladando seu eixo para a posição deformada, e uma flambagem por torção, rotando sua seção em torno do centro de corte.

A força resistente de cálculo considerando os estados limites de flambagem por flexão, por torção ou flexo-torção, deve ser determinada pela Equação 22.

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{1,1} \quad (22)$$

Onde:

χ = fator de redução associado à flambagem;

Q = coeficiente de flambagem local;

A_g = área bruta da seção transversal da barra;

f_y = limite de escoamento do aço.

O fator de redução associado à compressão é dado conforme a Equação 23 ou 24:

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2}, \text{ para } \lambda_0 \leq 1,5 \quad (23)$$

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}, \text{ para } \lambda_0 > 1,5 \quad (24)$$

O índice de esbeltez reduzido é dado pela Equação 25:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad (25)$$

Onde:

N_e = força normal de flambagem elástica da barra, que é obtida através das Equações 26 a 28, se for uma seção de dupla simetria ou simétrica em relação a um ponto.

Flambagem por flexão em relação ao eixo principal de inércia X:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} \quad (26)$$

Flambagem por flexão em relação ao eixo principal de inércia Y:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} \quad (27)$$

Flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal Z:

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + G J \right] \quad (28)$$

Para calcular o raio de giração polar da seção bruta, usa-se a Equação 29:

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2} \quad (29)$$

Onde:

I_x = momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo X;

$K_x L_x$ = comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo X;

r_x = raio de giração da seção transversal em relação ao eixo X;

I_y = momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo Y;

$K_y L_y$ = comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo Y;

r_y = raio de giração da seção transversal em relação ao eixo Y;

$K_z L_z$ = comprimento efetivo de flambagem por torção;

E = módulo de elasticidade do aço;

C_w = constante de empenamento da seção;

G = módulo de elasticidade transversal do aço;

A_g = área bruta da seção transversal;

J = módulo de inércia à torção uniforme;

x_0 e y_0 = distâncias do centro de gravidade até o ponto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Projeto estrutural

Neste capítulo serão apresentados a determinação dos carregamentos, o modelo estrutural adotado, bem como o dimensionamento da estrutura. Os carregamentos foram divididos em permanente, variável e excepcional. A seguir serão descritos os critérios adotados para o somatório das cargas.

O peso próprio da estrutura foi estimado através de observação de estruturas existentes, com características semelhantes, como vão e modelo geométrico (NETO, 2006). O peso próprio dos perfis foram obtidos através do Catálogo de Perfis Estruturais da Gerdau, sendo considerado o perfil W310x23,8 para os banzos superiores e inferiores e para as 16 vigas que fazem a ligação entre as duas treliças paralelas; e o perfil W200x15,0 para as diagonais e montantes das treliças. As seções dos perfis são 101x305mm e 100x200mm respectivamente. Os perfis escolhidos estão disponíveis em aços ASTM A572, ASTM A992 e ASTM A131. O aço adotado é o ASTM A572.

4.2 Ações permanentes

Para calcular as cargas permanentes da estrutura inicialmente foram determinadas as cargas dos elementos, de acordo com a NBR 6120 (ABNT, 1980) e NBR 8800 (ABNT, 2008). Na cobertura foi considerada a ação atuante das telhas de 0,10 kN/m² e a estrutura metálica com 0,20 kN/m², totalizando 0,30 kN/m². Peso próprio de piso, guarda-corpos e demais revestimentos foi considerado 0,30 kN/m².

4.3 Ações variáveis

O carregamento móvel é de 5 kN/m². Para calcular a ação do vento sobre a estrutura inicialmente devem ser definidos os valores da velocidade básica do vento, bem como dos fatores de ponderação.

A velocidade básica do vento (V_0) é a velocidade de uma rajada de três segundos de duração, a dez metros de altura, em campo aberto e plano, ultrapassada, em média, uma vez em 50 anos. A NBR 6123 (ABNT, 1988) apresenta um gráfico de isopletras da velocidade básica no Brasil. Neste caso, para a cidade de Novo Hamburgo/RS, a velocidade básica V_0 considerada é de 45 m/s.

O fator topográfico (S_1) leva em consideração as variações da superfície do terreno. De acordo com a NBR 6123 (ABNT, 1988), considerando que o projeto será construído sobre um terreno plano, tem-se $S_1=1$.

O fator de rugosidade (S_2) é obtido combinando-se uma categoria (rugosidade do terreno), uma classe (dimensões do projeto) e a altura. Conforme a tabela 2 da NBR 6123 (ABNT, 1988) obteve-se para um terreno de categoria IV e uma edificação de classe B, para a altura de 8,30 m (valor correspondente à altura da cobertura da passarela), o fator $S_2=0,81$.

O fator estatístico (S_3) considera o grau de segurança e a vida útil requeridos pela edificação, com base em um período de recorrência de 50 anos. Neste trabalho, o fator S_3 foi considerado igual a um.

Utilizando-se as equações 10 e 9 obtém-se, respectivamente, o valor da velocidade característica do vento igual a 36,45 m/s e a pressão dinâmica do vento igual a 814,43 N/m². Para este trabalho de conclusão foi verificada apenas a direção do vento em X (0°), que incide perpendicularmente à face longitudinal da passarela, visto que o vento incidente na direção Y (90°) é reduzido, devido a área de aço da seção transversal dos perfis ser pequena. Logo, é visto que essa situação não levará a condição mais desfavorável.

Na direção X os elementos da passarela que recebem o vento são os banzos e as treliças. A NBR 6123 (ABNT, 1988) considera que a força do vento atuando em barras prismáticas é dada pela Equação 30.

$$F_a = C \times q \times K \times l \times c \quad (30)$$

Onde:

F = força de arrasto, em N;

C = coeficiente de arrasto, dado pela tabela 12 da NBR 6123 (ABNT, 1988);

q = pressão dinâmica do vento, igual a 814,43 N/m²;

K = fator de redução, dado pela tabela 11 da NBR 6123 (ABNT, 1988);

l = comprimento da barra, em m;

c = largura da barra prismática, em m.

Não multiplicando o comprimento das barras, encontra-se o valor da força de arrasto ao longo dos banzos e das treliças. Na Tabela 2 são apresentados os valores da força de arrasto para cada elemento.

Tabela 2 – Barras prismáticas para o vento em X (0°)

Elemento	Fator de Redução (K)	Largura (c)	Coeficiente de Arrasto (C)	Força de Arrasto (kN/m)
Banzos	0,92	0,305	2,05	0,468
Montantes	0,70	0,2	2,05	0,232
Diagonais	0,72	0,2	2,05	0,240

Fonte: do autor (2018).

4.4 Combinações de cargas

A seguir serão apresentadas as combinações utilizadas no dimensionamento, sendo que no *software* Ftool foi realizada a verificação somente para uma combinação, e no *software* ANSYS foram um total de cinco combinações, que são mostradas no Apêndice A.

4.4.1 Combinações últimas normais

As combinações últimas normais derivam do uso previsto para a edificação. Para cada combinação, aplica-se a Equação 31, sendo os coeficientes de ponderação extraídos das tabelas 1 e 2 da NBR 8800 (ABNT, 2008).

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \varphi_{0j} F_{Qj,k}) \quad (31)$$

Onde:

γ_{gi} = coeficiente de ponderação das ações permanentes;

$F_{Gi,k}$ = valores característicos das ações permanentes;

γ_{q1} = coeficiente de ponderação da ação variável considerada principal;

$F_{Q1,k}$ = valor característico da ação variável considerada principal;

γ_{qj} = coeficiente de ponderação das ações variáveis que podem atuar em conjunto com a ação variável principal;

φ_{0j} = fator de combinação das ações variáveis;

$F_{Qj,k}$ = valores característicos das ações variáveis que podem atuar juntamente com a ação variável principal.

4.4.2 Combinação última excepcional

A combinação última excepcional leva em consideração ações que podem resultar em efeitos catastróficos para a estrutura. Para esta combinação, de acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008), aplica-se a Equação 32.

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + F_{Q,exc} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \varphi_{0j,ef} F_{Qj,k}) \quad (32)$$

Onde:

γ_{gi} = coeficiente de ponderação das ações permanentes;

$F_{Gi,k}$ = valores característicos das ações permanentes;

$F_{Q,exc}$ = valor da ação excepcional;

γ_{qj} = coeficiente de ponderação das ações variáveis que podem atuar em conjunto com a ação variável principal;

$\varphi_{0j,ef}$ = fator de combinação das ações variáveis;

$F_{Qj,k}$ = valores característicos das ações variáveis que podem atuar juntamente com a ação variável principal.

4.4.3 Combinações quase permanentes de serviço

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008) as combinações quase permanentes podem atuar durante grande parte do período de vida da estrutura. Nesta, todas as ações variáveis são aplicadas com seus valores quase permanentes. Ela está relacionada com deformações excessivas que não provoquem danos a outros elementos da construção, e pode ser definida com a Equação 33.

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=1}^n (\varphi_{2j} F_{Qj,k}) \quad (33)$$

Onde:

$F_{Gi,k}$ = valores característicos das ações permanentes;

φ_{2j} = fator de redução das ações variáveis;

$F_{Qj,k}$ = valores característicos das ações variáveis.

4.5 Análise no *software* Ftool

Para calcular os carregamentos a inserir no *software* Ftool foi realizada apenas uma combinação, pois considerou-se que as cargas de vento e excepcional

atuam na direção perpendicular à face longitudinal da estrutura, desta forma, pela análise do Ftool ser somente no plano, impossibilitou o lançamento destas cargas. Foram considerados os fatores de majoração 1,4 para os carregamentos permanentes e 1,5 para as cargas variáveis. Na Tabela 3 são apresentados os carregamentos, que foram separados em duas partes, superior e inferior, sendo que o primeiro considera a cobertura, sobrecarga e metade do peso próprio, e o segundo a carga variável, piso/revestimentos e também metade do peso próprio.

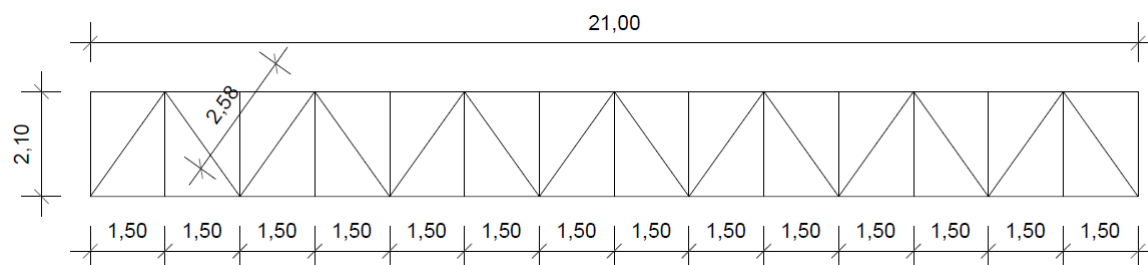
Tabela 3 – Carregamentos

Parte Superior	Elemento	Carga (kN/m)	Coef. Maj.	Total	Nós Centrais	Nós de Extremidade
	Cobertura	0,375	1,4			
	Sobrecarga	0,3125	1,5			
	Metade Peso Próprio	0,5	1,4			
Parte Inferior	Elemento	Carga (kN/m)	Coef. Maj.	Total	Nós Centrais	Nós de Extremidade
	Piso / Revestimento	0,375	1,4			
	Metade Peso Próprio	0,5	1,4			
	Carga Variável	6,25	1,5			

Fonte: do autor (2018).

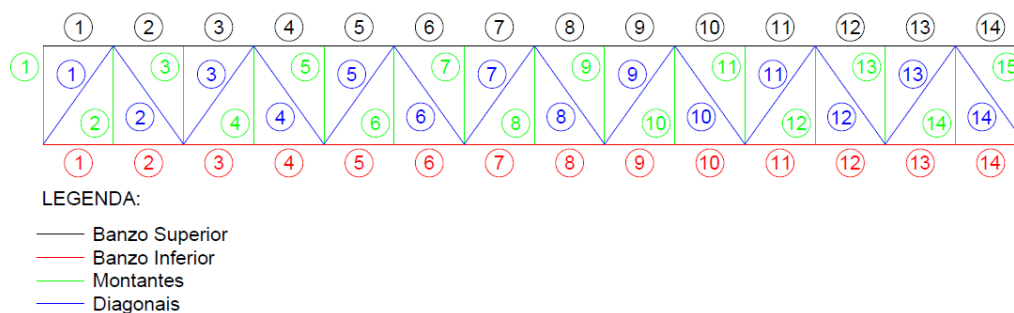
Com os carregamentos nodais, foi inserido no *software* Ftool o modelo estrutural com as dimensões de projeto, e em cada nó foram adicionadas as cargas pontuais. Nas Figuras 14, 15 e 16 são apresentadas as dimensões da estrutura, a numeração dos elementos e os carregamentos aplicados, respectivamente.

Figura 14 – Dimensões da treliça (m)



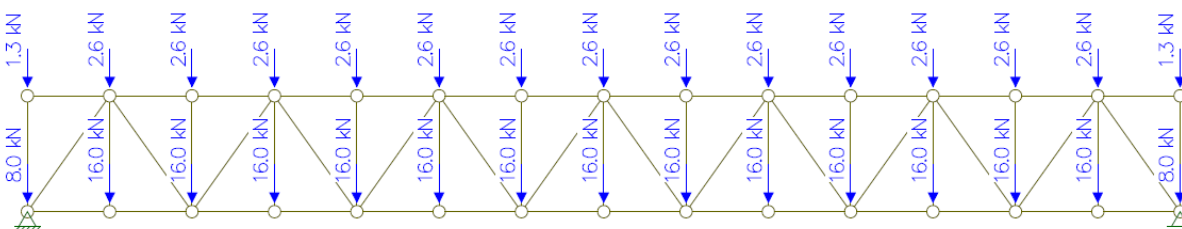
Fonte: do autor (2018).

Figura 15 – Numeração utilizada nas barras da treliça



Fonte: do autor (2018).

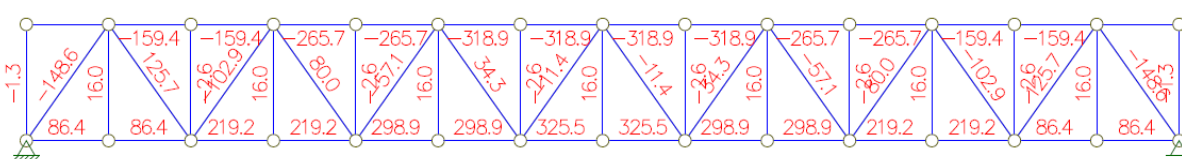
Figura 16 – Modelo estrutural lançado no *software* Ftool



Fonte: do autor (2018).

Após o lançamento das cargas nodais, foram verificados os esforços axiais atuantes na estrutura, que são mostrados na Figura 17.

Figura 17 – Forças axiais atuantes na treliça (kN)



Fonte: do autor (2018).

4.5.1 Dimensionamento à tração

Aplicando-se a Equação 11 obteve-se os valores para o escoamento da seção bruta dos perfis adotados. Para verificar se o índice de esbeltez estava atendendo à recomendação da NBR 8800 (ABNT, 2008), foi utilizada a Equação 16. Na Tabela 4 são mostrados os valores das forças de tração máximas nos elementos da estrutura bem como o percentual contribuinte para a resistência à tração.

Tabela 4 – Verificação do dimensionamento à tração

Elemento	Nº	Área da seção (cm²)	Força Solicitante (kN)	Esc. da Seção Bruta (kN)	Esbeltez (≤ 300)	Percentual cont. Resistência à Tração
Banzo Inferior	7	30,7	325,50	962,86	13	33,81%
Montante	2	19,4	16,00	608,45	26	2,63%
Diagonal	2	19,4	125,70	608,45	31	20,66%

Fonte: do autor (2018).

Analizando o índice de esbeltez de cada elemento e o percentual que contribui para a resistência à tração, percebe-se que ambos os perfis escolhidos atendem plenamente às solicitações de tração.

4.5.2 Dimensionamento à compressão

Através das Equações 17 a 29 foi possível realizar as verificações das resistências à compressão dos perfis escolhidos. Na Tabela 5 pode-se visualizar os percentuais da resistência à flambagem para os elementos com as forças máximas de compressão.

Tabela 5 – Verificação do dimensionamento à compressão

Elemento	Nº	Força Solicitante (kN)	Força Resistente (kN)	Percentual cont. Resistência à Compressão
Banzo Superior	7	328,90	583,31	56,4%
Montante	3	260,00	293,80	88,5%
Diagonal	1	148,60	205,86	72,2%

Fonte: do autor (2018).

Com o percentual de resistência à compressão de cada perfil escolhido nota-se que os mesmos atendem às solicitações. No Apêndice C podem ser verificadas as planilhas eletrônicas do *software* Excel utilizadas para os cálculos de resistência à compressão.

4.6 Modelagem no *software* ANSYS

A seguir será descrito o processo de criação do modelo numérico da passarela no *software* ANSYS, versão 14.5 APDL. No Apêndice B é apresentado o *script* com os comandos que foram inseridos no programa até a obtenção dos resultados. O modelo serve para demonstrar o comportamento global da estrutura, desta forma, efeitos locais como a resistência das ligações não são avaliados.

4.6.1 Sobre o modelo

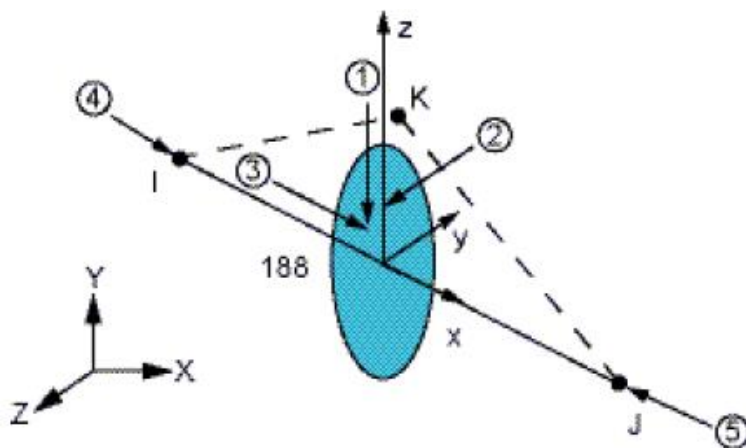
Para trabalhar com elementos estruturais o *software* ANSYS possui uma biblioteca de elementos finitos. Para a modelagem da treliça foram avaliados dois tipos de elementos, o *link180* e o *beam188*. O elemento *link180* tem apenas rigidez axial, o que representaria de forma adequada o modelo de treliça. Entretanto depois de alguns testes iniciais, optou-se por utilizar o elemento *beam188*, que traria a vantagem de modelar a seção transversal mais detalhadamente.

O elemento finito *beam188* é mais utilizado para vigas esbeltas e robustas, pois baseia-se na Teoria de Timoshenko que considera deformações por cisalhamento. Este elemento tem sete graus de liberdade em cada nó, sendo que neste trabalho optou-se por considerar seis deles, pois o sétimo grau de liberdade é opcional no *software*, é útil nos casos em que se quer restringir o empenamento da peça. Os outros graus de liberdade são: rotações em torno dos eixos x, y e z, e translações em x, y e z (ANSYS INCORPORATION, 2012).

O *beam188* permite análise da elasticidade, plasticidade e fissuração do elemento. Também possibilita a utilização de mais de um material para formar a seção transversal da peça. Durante a inserção do elemento são utilizados os nós I e J para o sistema global, já o nó K deve ser inserido para definir a orientação da seção transversal da peça. Caso não seja informada a posição do nó K o *software* a define automaticamente, mas pode ocasionar a erros relacionados com a orientação da peça, e assim causar problemas devido à possibilidade dos carregamentos serem aplicados nas outras faces da peça, conforme sua orientação. Para definir o elemento são utilizados os nós I, J e K. Sendo que I e J representam o eixo X e

também o eixo Y (ortogonal a X), e o plano IJK contém o nó K, no sentido do eixo Z. A Figura 18 ilustra os nós e os planos para o elemento *beam188* (ANSYS INCORPORATION, 2012).

Figura 18 – Elemento *beam188*

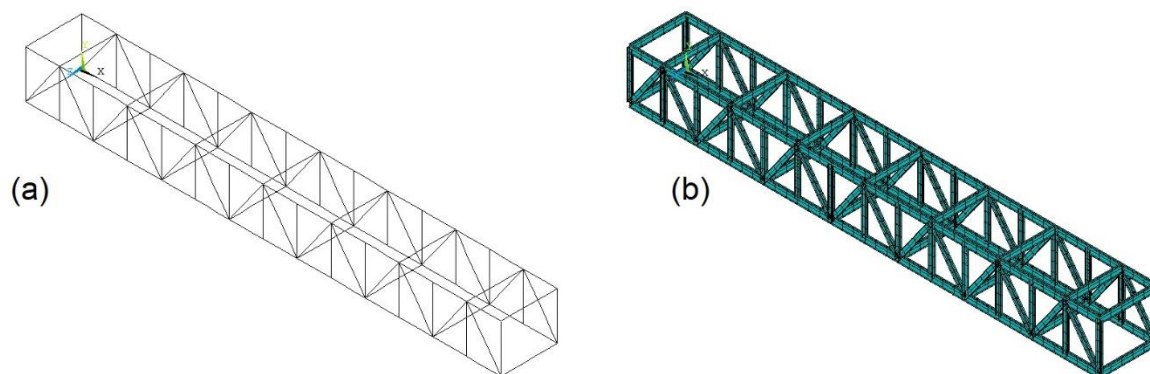


Fonte: (ANSYS INCORPORATION, 2012).

Quanto à definição do material foi considerado que o aço apresenta comportamento elástico linear, e as propriedades consideradas foram: módulo de elasticidade igual a 2×10^8 kN/m², massa específica de 7850 kg/m³ e coeficiente de Poisson igual a 0,3 (PFEIL; PFEIL, 2008).

Após a definição das propriedades do aço utilizado, foi iniciada a criação do modelo físico, com inserção dos pontos e posteriormente as linhas. Foram utilizadas as coordenadas em X variando entre 0 a 21,00 m, coordenadas em Y variando de 0 a 2,10 m e no eixo Z variando entre 0 e 2,50 m. Com os pontos e linhas inseridos no *software*, foi possível construir o modelo de elementos finitos, onde cada elemento foi associado ao tipo de material. Na Figura 19 são apresentados o modelo com os elementos finitos (a) e as seções transversais dos perfis (b).

Figura 19 – Modelo de elementos finitos (a) e seções transversais dos perfis (b)



Fonte: do autor (2018).

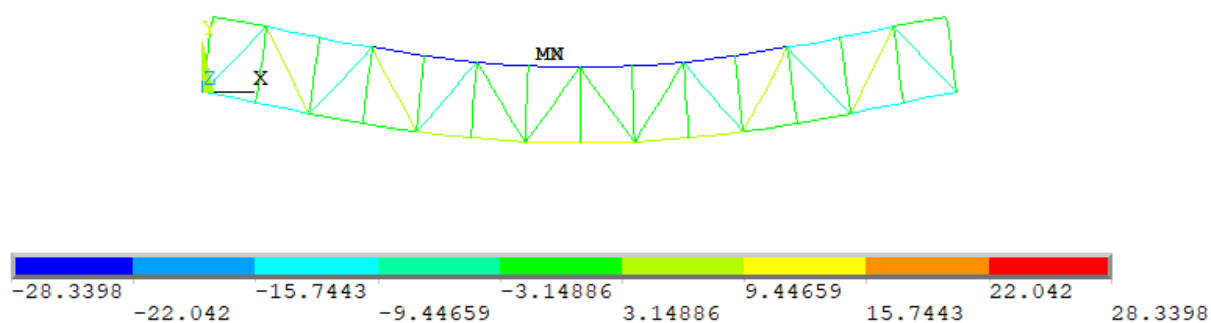
Depois da definição do tipo de material aplicado a cada elemento foram colocadas as condições de contorno nas extremidades do modelo físico, para impedir o deslocamento nas três direções, devido ao modelo ser tridimensional. Desta forma o mesmo estaria sujeito às deformações provenientes dos carregamentos, que foram aplicados um a um.

Quanto ao peso próprio dos elementos estruturais, o software calculou com base nas seções transversais dos perfis e a massa específica do aço. A ação desta carga foi aplicada à estrutura com a ativação da aceleração gravitacional. As demais cargas foram adicionadas como equivalentes, onde a carga total foi dividida pelo número de nós e aplicada em cada nó. A definição da quantidade de nós em cada elemento depende do tamanho da malha de elementos finitos.

4.6.2 Breve estudo de malha

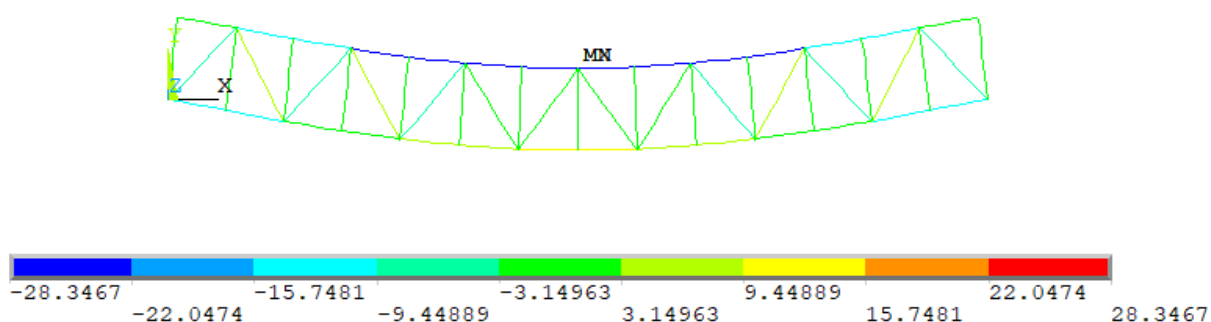
A malha gerada pelo *software* divide os elementos na quantidade de nós necessários para os cálculos e deformações. Cabe ao usuário a adoção de um tamanho de malha que satisfaça suas necessidades de projeto. Neste trabalho inicialmente foram geradas uma malha com 0,5 m e uma com 0,3 m de lado. Para verificar se os tamanhos propostos estavam adequados gerou-se o resultado das forças axiais no eixo X (kN) e os deslocamentos no eixo Y (m), para ambos os tamanhos de malhas, com o peso dos elementos estruturais atuando na estrutura. Nas Figuras 20 e 21 são mostrados os resultados obtidos para as malhas de 0,5 m e 0,3 m, respectivamente.

Figura 20 – Forças axiais no eixo X para a malha 0,5 m



Fonte: do autor (2018).

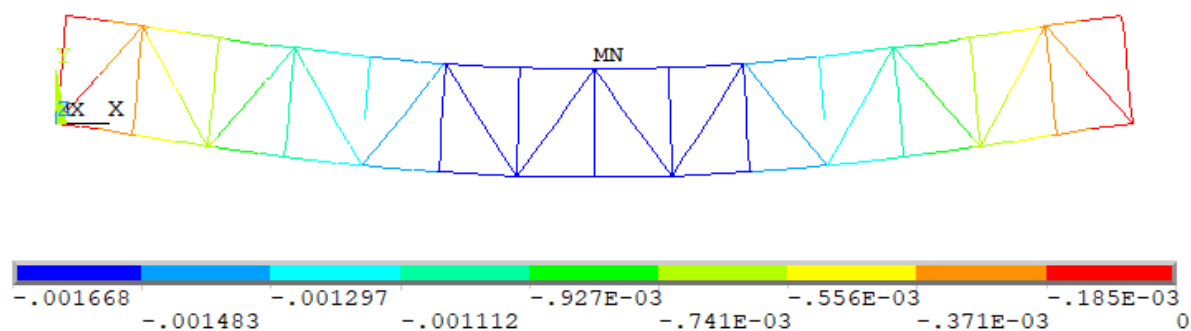
Figura 21 – Forças axiais no eixo X para a malha 0,3 m



Fonte: do autor (2018).

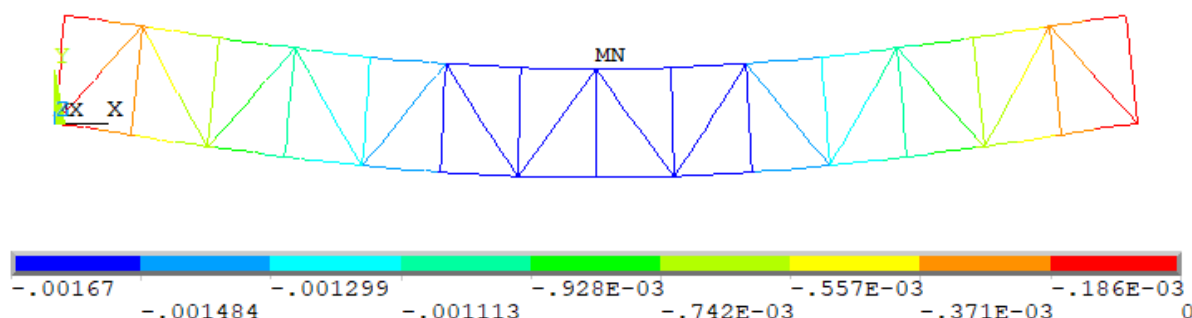
Verificando os valores de forças axiais para os dois tamanhos de malhas, notou-se que a diferença era da ordem de 0,025 por cento. Esta análise também foi realizada para os deslocamentos em torno do eixo Y, cujos resultados estão mostrados nas Figuras 22 e 23.

Figura 22 – Deslocamentos no eixo Y para a malha 0,5 m



Fonte: do autor (2018).

Figura 23 – Deslocamentos no eixo Y para a malha 0,3 m



Fonte: do autor (2018).

Analizando os deslocamentos em torno do eixo Y para os diferentes tamanhos de malhas, pôde-se observar que a diferença foi cerca de 0,10 por cento. Foi considerado então que ambas as malhas atenderam os parâmetros de cálculo. Portanto o dimensionamento foi realizado utilizando a malha de lado 0,5 m, pois o processamento de dados pelo *software* seria mais leve e rápido. O modelo final da estrutura ficou com um total de 1071 nós e 571 elementos.

4.6.3 Combinações de ações

No Apêndice A são mostrados detalhadamente os coeficientes de ponderação das ações permanentes (γ_g), das ações variáveis principais (γ_q) e também os coeficientes de redução (ψ_0 e ψ_2). Na Tabela 6 são apresentadas as cinco combinações realizadas no dimensionamento, sendo três combinações últimas normais, uma combinação última excepcional (devido a somente uma ação excepcional atuante) e também uma combinação para o estado limite de serviço quase permanente.

Tabela 6 – Combinações de ações

Comb. Nº	Coeficientes	Peso próprio ponderado (kN/m)	Ação variável ponderada (kN/m)
11	$1,25 + 1,5 + 1,5 + 1,5 \cdot 0,5 + 1,4 \cdot 0,6$	3,875	0,790
12	$1,25 + 1,5 + 1,5 \cdot 0,6 + 1,5 + 1,4 \cdot 0,6$	8,938	0,790
13	$1,25 + 1,5 + 1,5 \cdot 0,6 + 1,5 \cdot 0,5 + 1,4$	8,656	1,317
14	$1,25 + 1,5 + 1,5 \cdot 0,6 + 1,5 \cdot 0,5 + 1,4 \cdot 0,6 + 1,0$	8,656	$0,790 + 100 \text{ kN}$
15	$1,0 + 1,0 + 0,3 + 0,3$	4,1125	0,0

Fonte: do autor (2018).

Com os valores de cargas ponderados foram inseridos no *software* ANSYS como cargas equivalentes nodais, conforme descrito no item 4.6.1.

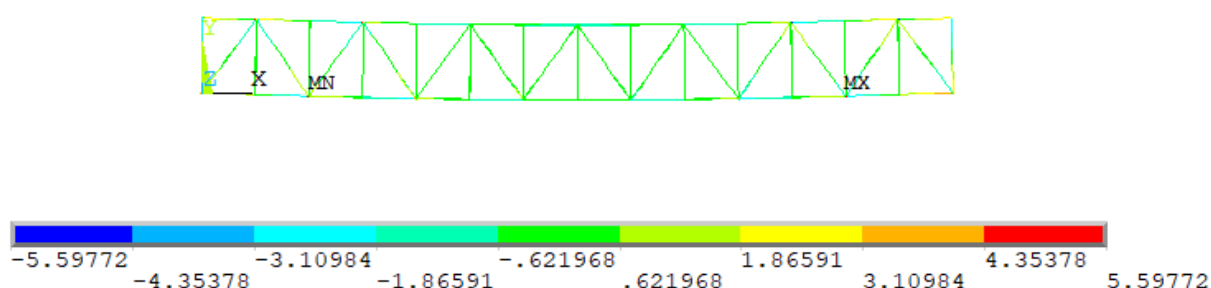
4.7 Resultados da análise no *software* ANSYS

A seguir serão apresentados os valores das tensões axiais e deslocamentos obtidos no *software* ANSYS. Para cada combinação última normal foi verificado também o momento fletor atuante, devido à ação do peso próprio da estrutura.

4.7.1 ELU normal

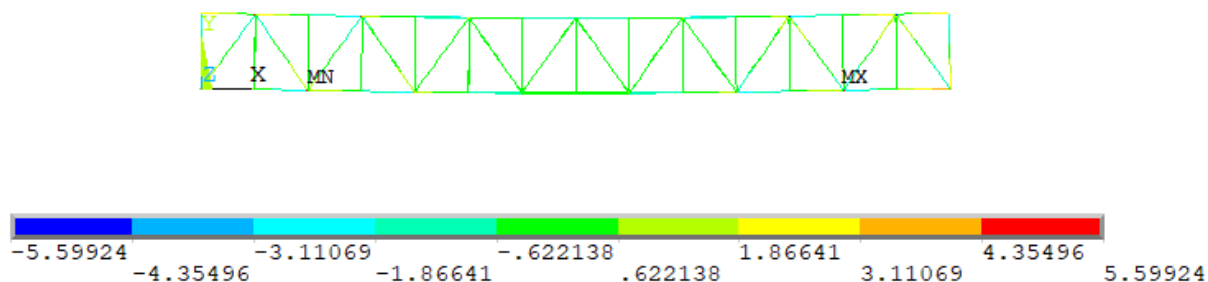
Para as combinações no ELU normal, o peso próprio da estrutura foi majorado com γ_g igual a 1,25, o peso próprio dos elementos não estruturais foi majorado com γ_g igual a 1,5. Os demais coeficientes de ponderação podem ser visualizados no Apêndice A. Inicialmente foram analisados os momentos fletores. Nas Figuras 24 a 26 são mostrados os valores de momentos fletores (kN.m) encontrados para as combinações 11, 12 e 13.

Figura 24 – Momento fletor da combinação 11



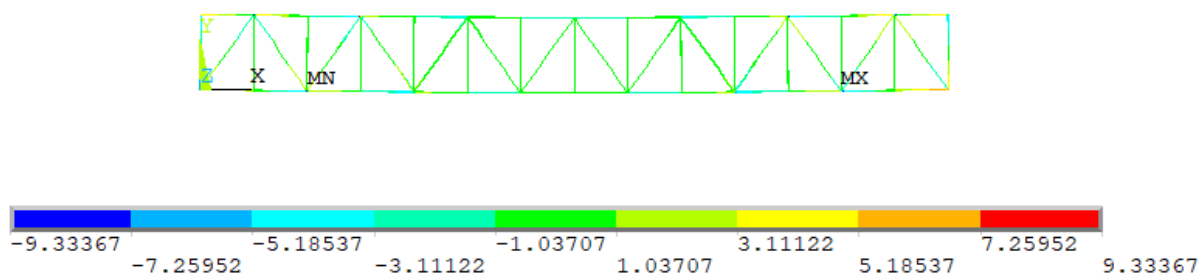
Fonte: do autor (2018).

Figura 25 – Momento fletor da combinação 12



Fonte: do autor (2018).

Figura 26 – Momento fletor da combinação 13

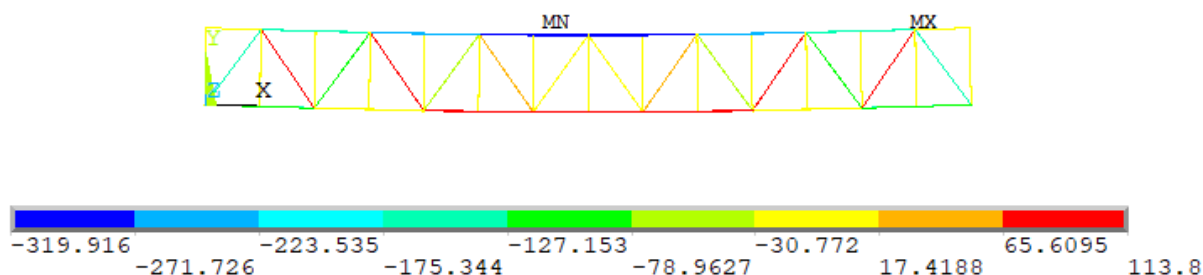


Fonte: do autor (2018).

Analisando os valores máximos das figuras 24 a 26 nota-se que existe uma pequena parcela de momento fletor atuando sobre a estrutura, que pode ser considerada como um esforço secundário que não afeta o dimensionamento, devido às barras da treliça serem esbeltas. A resistência dos perfis quanto ao momento fletor é 71,92 kN.m para o perfil W310x23,8 e 34,31 kN.m para o perfil W200x15,0. Desta forma, os momentos oriundos da rigidez dos nós podem ser desprezados (PFEIL; PFEIL, 2008). Portanto, as verificações no *software* ANSYS serão somente sobre as tensões axiais.

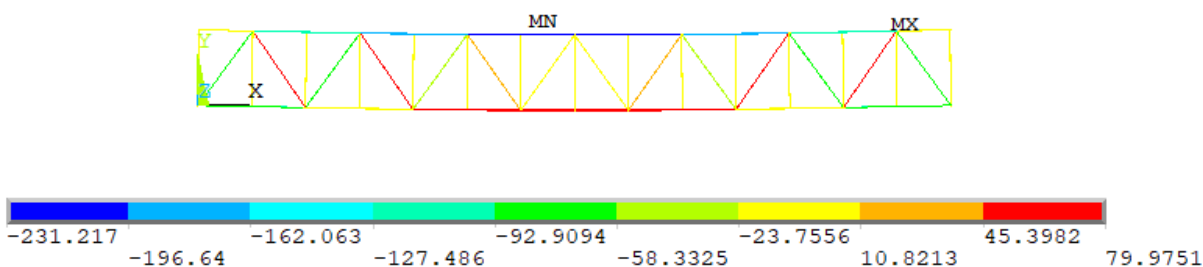
Nas Figuras 27 a 29 são mostrados os valores de esforços axiais para as combinações últimas normais.

Figura 27 – Esforços axiais da combinação 11 (kN)



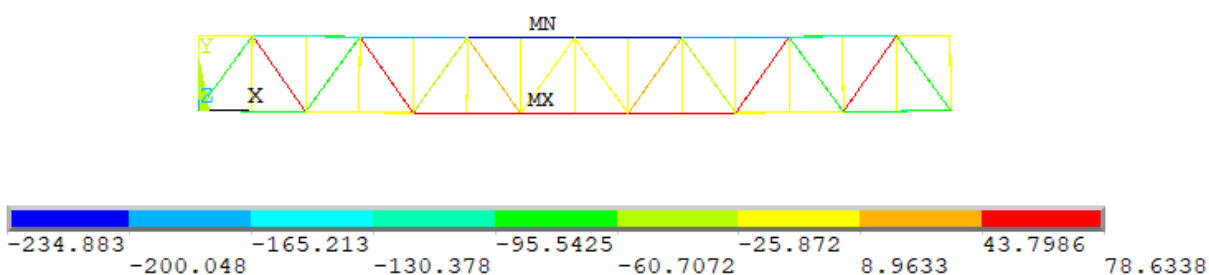
Fonte: do autor (2018).

Figura 28 – Esforços axiais da combinação 12 (kN)



Fonte: do autor (2018).

Figura 29 – Esforços axiais da combinação 13 (kN)



Fonte: do autor (2018).

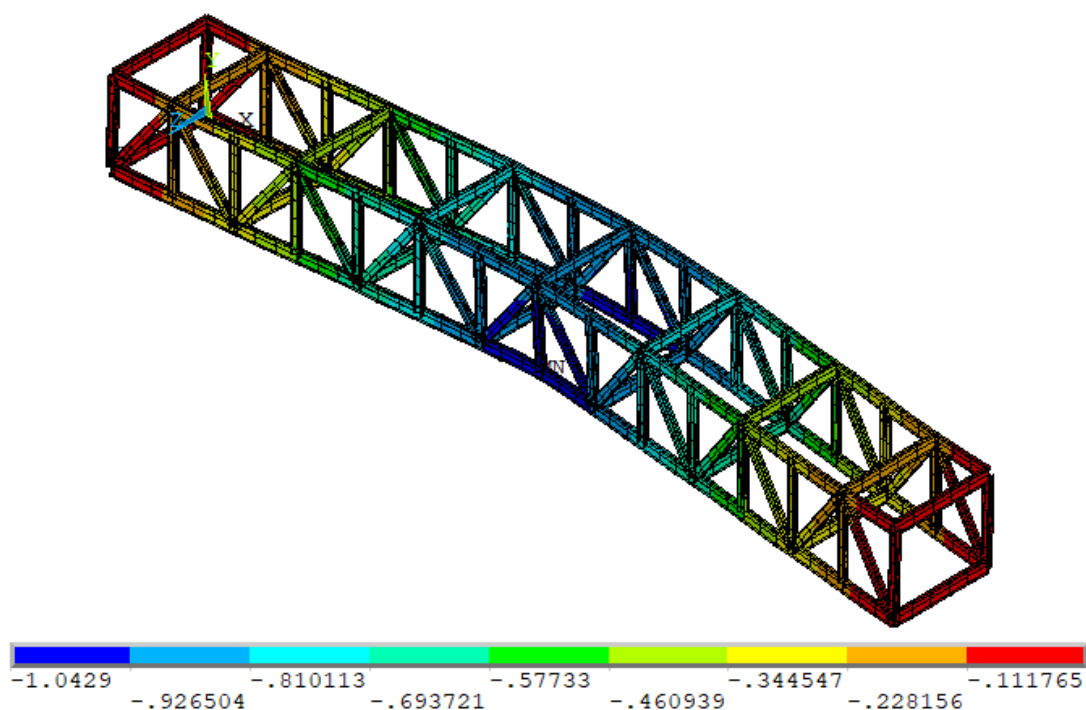
Comparando os valores obtidos para os esforços axiais nas três combinações, percebe-se que a primeira combinação resultou em forças maiores, com valor de compressão igual a 319,92 kN no centro do banzo superior, cuja resistência à compressão é mostrada na Tabela 5, evidenciando que nesta condição o percentual de contribuição para resistir à compressão é 54,85%. Quanto aos esforços de tração, a parcela de contribuição é de 11,82%.

4.7.2 ELU excepcional

Para a combinação no ELU excepcional o peso próprio da estrutura foi majorado com γ_g igual a 1,25, o peso próprio dos elementos não estruturais foi majorado com γ_q igual a 1,5. Nesta combinação, além das cargas variáveis foi inserida uma carga pontual de 100 kN, aplicada no ponto central da estrutura. Esta carga excepcional aumentou os esforços axiais nas barras da treliça e ocasionou na deformação horizontal da estrutura como um todo. Nas Figuras 30 e 31 são mostrados os resultados obtidos com a combinação ELU excepcional.

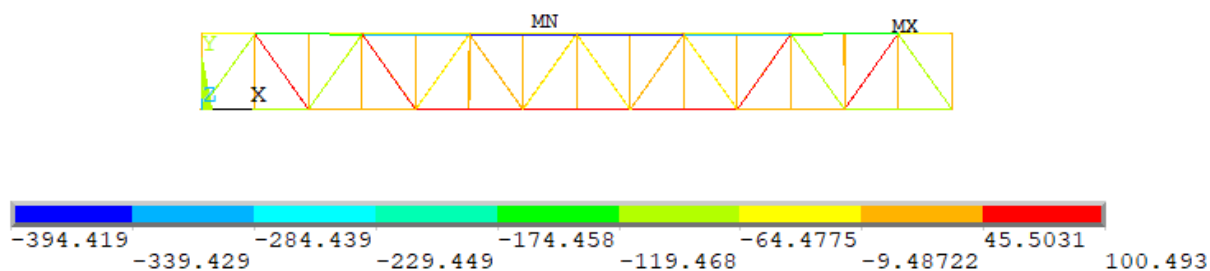
Vale ressaltar que nesta combinação não se faz necessária a verificação quanto ao deslocamento da estrutura. A NBR 7188 (ABNT, 2013) diz que todos os elementos de ligação e os pilares da passarela devem ser dimensionados para esta carga, como uma forma mitigadora de eventuais impactos. Portanto, como neste trabalho não foram dimensionados pilares nem elementos de ligação, a verificação quanto ao deslocamento da estrutura é apenas ilustrativa, uma vez que dependendo da magnitude de uma possível colisão de um veículo na passarela, não há como eliminar a hipótese de colapso parcial ou total da estrutura.

Figura 30 – Deslocamento horizontal da estrutura em perspectiva (m)



Fonte: do autor (2018).

Figura 31 – Esforços axiais na combinação 14 (kN)



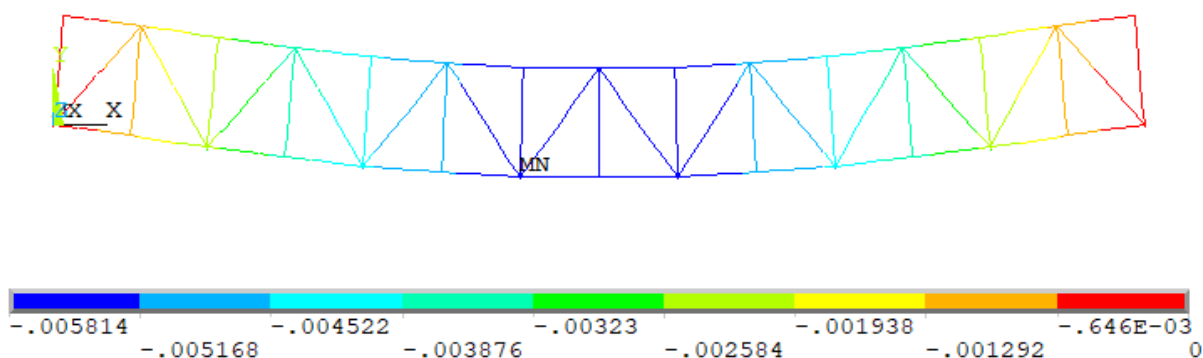
Fonte: do autor (2018).

Com os valores de forças axiais encontrados nesta combinação verificou-se que o percentual de contribuição para resistir à compressão é 67,62%. Quanto aos esforços de tração, a parcela de contribuição é de 10,44%.

4.7.3 ELS quase permanente

Para a combinação no ELS quase permanente tanto o peso próprio da estrutura quanto o peso próprio dos elementos não estruturais foram considerados com seus valores quase permanentes, então manteve-se γ_g e γ_q igual a 1,00. Apenas as ações variáveis foram ponderadas. Nesta combinação foram verificadas somente as deformações excessivas da construção. Na Figura 32 são apresentados os valores dos deslocamentos da estrutura.

Figura 32 – Deslocamento da estrutura para o ELS quase permanente (m)



Fonte: do autor (2018).

Analisando os deslocamentos máximos para o ELS, percebe-se que atendem aos critérios previstos na NBR 8800 (ABNT, 2008), pois ficou em 6,92% do valor permitido para o deslocamento máximo, que é de 8,4 cm.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O quilômetro 18 da RS-239 em Novo Hamburgo apresenta uma elevada quantidade de pessoas transitam diariamente, atravessando a rodovia. Essa travessia poderia ser realizada de maneira mais segura, o que pode ser concretizado com a instalação de uma passarela, pois elimina o conflito entre os veículos e os pedestres.

O principal objetivo deste trabalho foi dimensionar os perfis principais da estrutura de uma passarela metálica treliçada, visando o conforto e segurança dos usuários, bem como o atendimento aos critérios estabelecidos nas normas de construção civil que regem estes projetos. Para isso, foram verificadas estruturas existentes com características semelhantes, então foram escolhidos dois tipos de perfis para serem submetidos à análise, sendo o perfil W310x23,8 para as vigas principais e o perfil W200x15,0 para as diagonais e montantes da treliça.

Inicialmente foi realizada a verificação através do *software* Ftool, onde foi lançada a estrutura com o vão a vencer e as dimensões dos componentes da treliça. Em seguida foram levantadas as cargas atuantes na estrutura, como peso próprio dos elementos estruturais e também elementos não estruturais. As cargas foram lançadas em cada nó da estrutura para obtenção dos esforços axiais nas barras. Posteriormente foram verificadas as piores condições para cada elemento da treliça, de acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008), calculou-se o percentual de cada elemento que contribuía para os esforços axiais, e então pôde-se verificar que para tração os perfis chegaram num máximo de 33,8% e compressão o máximo foi de 88,5%, mostrando que os perfis escolhidos atendiam às solicitações.

Posteriormente a estrutura foi lançada no *software* ANSYS, desta vez foram realizadas cinco combinações de ações, sendo três para o estado limite último (combinação normal), uma para o estado limite último (combinação excepcional) e uma para o estado limite de serviço (combinação quase permanente). Verificando a pior situação para as três primeiras combinações de ELU, pôde-se notar que o percentual contribuinte dos perfis para a compressão foi de 54,85%, e para a tração foi de 11,82%. Já no ELU para a combinação excepcional foi possível analisar a deformação da estrutura com uma carga pontual de 100 kN aplicada no ponto mais desfavorável, esta fez com que aumentassem as forças axiais atuantes na estrutura, sendo que os perfis ficaram com um percentual contribuinte de 67,62% à compressão e 10,44% à tração. No último caso, ELS, verificou-se que a deformação máxima da estrutura ficou em 6,92% da deformação máxima permitida.

As diferenças entre os resultados obtidos nos dois *softwares* eram esperadas, pois a modelagem é bastante distinta, além da questão de um modelo ser bidimensional e outro tridimensional, no *software* Ftool foi modelado com ligações perfeitamente rotuladas, e no *software* ANSYS com ligações rígidas. O segundo modelo tenta ser mais realista, mostrando que existem pequenos momentos fletores e que os esforços axiais somente devido às forças axiais acabam sendo reduzidos.

Considerando os valores obtidos nos dimensionamentos em ambos os *softwares*, pode-se dizer que os objetivos foram atingidos, pois a estrutura atendeu às questões de segurança e conforto para os pedestres.

Como sugestão de trabalhos futuros, pode ser realizado um dimensionamento completo da estrutura, envolvendo escadas e rampas de acesso, bem como estimativa de valores para a construção da passarela.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1980.

_____. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

_____. **NBR 7007**: Aços para perfis laminados para uso estrutural. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **NBR 7187**: Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR 7188**: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **NBR 9050**: Acessibilidade a Edificações, Mobiliário, Espaços e Equipamentos Urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABRASPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PEDESTRES. **PASSARELAS E PASSAGENS SUBTERRÂNEAS**: PROPOSTAS. Joinville, 2000. 9 p.

BELLEI, Ildony H. **Edifícios Industriais em Aço**: Projeto e Cálculo. 6. ed. São Paulo: Pini, 2010.

BLESSMANN, Joaquim. **Ação do Vento em Edifícios**. 2. ed. Porto Alegre: Editora Universidade/UFRGS. 1989.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 2008.

DIAS, Luís A. de M. **Estruturas de aço**: Conceitos, Técnicas e Linguagem. 6. ed. São Paulo: Zigurate Editora. 2006.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ISF 216: PROJETO DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS**, 2015a. 11 p. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/download/sala-deimprensa/isf-216-projeto-de-obras-de-arte-especiais.pdf>>. Acesso em: 21 de outubro de 2017.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ISF 219: PROJETO DE PASSARELA PARA PEDESTRES**, 2015b. 6 p. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/download/sala-deimprensa/isf-219-projeto-de-passarelas-para-pedestres.pdf>>. Acesso em: 21 de outubro de 2017.

NETO, João Cucci. **Avaliação de 25 passarelas da cidade de São Paulo**. 2006. 250 p. Coletânea de trabalhos acadêmicos (Bacharel em Engenharia Civil)-Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2006. 1. Disponível em: <http://meusite.mackenzie.com.br/professor_cucci/passarelas.pdf>. Acesso em: 20 set. 2017.

PERES, M. S. **Estabilidade de colunas de nós com deslocamentos parcialmente restringidos**. Dissertação (Mestrado), UN:FCT, Lisboa, 2011.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de aço**: Dimensionamento prático. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

ROSENBLUM, Anna. **Pontes em estruturas segmentadas pré-moldadas protendidas: análise e contribuições ao gerenciamento do processo construtivo**. 2009. 199 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

RS-239 é campeã em atropelamentos com morte entre as rodovias estaduais. **Jornal NH**, Novo Hamburgo, 14 jun. 2017. Violência no trânsito, p. 4. Disponível em: <https://www.jornalnh.com.br/_conteudo/2017/06/noticias/regiao/2126542-rs-239-e-campea-em-atropelamentos-com-morte-entre-as-rodovias-estaduais.html>. Acesso em: 20 set. 2017.

SILVA, André Luiz V. da C.; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2006.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**: Fundamentos teóricos e práticos. 5. ed. São Paulo: Blucher. 1982.

VASCONCELOS, A. C. de. **Pontes brasileiras:** Viadutos e passarelas notáveis. São Paulo: Pini, 1993.

WILEI, John. **Building Structures Illustrated.** Hoboken: New Jersey. 2009.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Combinações de Ações

	Comb. Nº	Carga	Ações Permanentes		Ação Variável principal		Ação Variável não principal			Total Vertical (kN/m)	Total Horizontal (kN/m)
			Ygi	FGi (kN/m)	Yq1	Fq1,k (kN/m)	yqj	W0j	FQj,k (kN/m)		
ELU Normais - quase permanentes	1	Peso Próprio Estrutura	1,25	1,750	-	-	-	-	-	3,875	0,790
		Elementos não estruturais	1,50	0,375	-	-	-	-	-		
		Sobrecarga Cobertura	-	-	-	-	1,50	0,5	0,375		
		Vento	-	-	-	-	1,40	0,6	0,941		
	2	Peso Próprio Estrutura	1,25	1,750	-	-	-	-	-	8,938	0,790
		Elementos não estruturais	1,50	0,375	-	-	-	-	-		
		Sobrecarga Cobertura	-	-	1,50	0,375	-	-	-		
		Vento	-	-	-	-	1,40	0,6	0,941		
		Móvel	-	-	-	-	1,50	0,6	6,25		
	3	Peso Próprio Estrutura	1,25	1,750	-	-	-	-	-	8,656	1,317
		Elementos não estruturais	1,50	0,375	-	-	-	-	-		
		Sobrecarga Cobertura	-	-	-	-	1,50	0,5	0,375		
		Vento	-	-	1,40	0,941	-	-	-		
		Móvel	-	-	-	-	1,50	0,6	6,25		
	ELU Excepcional	4	Peso Próprio Estrutura	1,25	1,750	-	-	-	-	-	8,656
Elementos não estruturais			1,50	0,375	-	-	-	-	-		
Sobrecarga Cobertura			-	-			1,50	0,5	0,375		
Vento			-	-	-	-	1,40	0,6	0,941		
Móvel			-	-	-	-	1,50	0,6	6,25		
Excepcional			-	-	1,00	100 kN*	-	-	-		
ELS Def. Excessivas		5	Peso Próprio Estrutura	1,00	1,750	-	-	-	-	-	4,1125
	Elementos não estruturais		1,00	0,375	-	-	-	-	-		
	Sobrecarga Cobertura		-	-	0,3	0,375	-	-	-		
	Móvel		-	-	0,3	6,25	-	-	-		

APÊNDICE B – *Script* da Modelagem no Software ANSYS

```

/NOPR ! Suppress printing of UNDO process
/PMACRO ! Echo following commands to log
FINISH ! Make sure we are at BEGIN level
/CLEAR,NOSTART ! Clear model since no SAVE found
! WE SUGGEST YOU REMOVE THIS LINE AND THE FOLLOWING STARTUP
LINES
/NOPR
/PMETH,OFF,0
/title, PASSARELA
!comandos para deixar o fundo branco
/RGB,INDEX,100,100,100, 0
/RGB,INDEX, 80, 80, 80,13
/RGB,INDEX, 60, 60, 60,14
/RGB,INDEX, 0, 0, 0,15
/REPLOT
!
! Opções de fonte
! /DEV,Font,LEGEND,MENU
/dev,font,1,Courier*New,400,0,-16,0,0,,
!
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
/PREP7
!
!Tipos de elementos
!
ET,1,BEAM188
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,3,0
KEYOPT,1,4,0
KEYOPT,1,6,0
KEYOPT,1,7,0
KEYOPT,1,9,0
KEYOPT,1,11,0
KEYOPT,1,12,0
KEYOPT,1,15,0
!
!Tipo de material
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,2e8
MPDATA,PRXY,1,,0.3
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,7850
!
!Seção do beam
SECTYPE, 1, BEAM, I, diagonais, 0
SECOFFSET, CENT

```

SECDATA,0.1,0.1,0.2,0.0052,0.0052,0.0043,0,0,0,0,0

!

SECTYPE, 2, BEAM, I, vigastrans, 0

SECOFFSET, CENT

SECDATA,0.101,0.101,0.305,0.0067,0.0067,0.0056,0,0,0,0,0

!

!keypoints

K,1,0,0,0

K,2,1.5,0,0,

K,3,3,0,0,

K,4,4.5,0,0,

K,5,6,0,0,

K,6,7.5,0,0,

K,7,9,0,0,

K,8,10.5,0,0,

K,9,12,0,0,

K,10,13.5,0,0,

K,11,15,0,0,

K,12,16.5,0,0,

K,13,18,0,0,

K,14,19.5,0,0,

K,15,21,0,0,

K,16,0,2.1,0,

K,17,1.5,2.1,0,

K,18,3,2.1,0,

K,19,4.5,2.1,0,

K,20,6,2.1,0,

K,21,7.5,2.1,0,

K,22,9,2.1,0,

K,23,10.5,2.1,0,

K,24,12,2.1,0,

K,25,13.5,2.1,0,

K,26,15,2.1,0,

K,27,16.5,2.1,0,

K,28,18,2.1,0,

K,29,19.5,2.1,0,

K,30,21,2.1,0,

!

K,31,0,0,2.5

K,32,1.5,0,2.5,

K,33,3,0,2.5,

K,34,4.5,0,2.5,

K,35,6,0,2.5,

K,36,7.5,0,2.5,

K,37,9,0,2.5,

K,38,10.5,0,2.5,

K,39,12,0,2.5,

K,40,13.5,0,2.5,

K,41,15,0,2.5,

K,42,16.5,0,2.5,

K,43,18,0,2.5,
 K,44,19.5,0,2.5,
 K,45,21,0,2.5,
 K,46,0,2.1,2.5,
 K,47,1.5,2.1,2.5,
 K,48,3,2.1,2.5,
 K,49,4.5,2.1,2.5,
 K,50,6,2.1,2.5,
 K,51,7.5,2.1,2.5,
 K,52,9,2.1,2.5,
 K,53,10.5,2.1,2.5,
 K,54,12,2.1,2.5,
 K,55,13.5,2.1,2.5,
 K,56,15,2.1,2.5,
 K,57,16.5,2.1,2.5,
 K,58,18,2.1,2.5,
 K,59,19.5,2.1,2.5,
 K,60,21,2.1,2.5,
 !
 !Keypoints de orientação
 !Banzos em z=0
 K,61,0,1000,0
 !Banzos em z=2.5
 K,62,0,1000,2.5
 !Montante em z=0
 K,63,-1000,0,0
 !Montante em z=2.5
 K,64,-1000,0,2.5
 !Diagonais 1 em z=0
 K,65,-1000,1400,0
 !Diagonais 2 em z=0
 K,66,1000,1400,0
 !Diagonais 1 em z=2.5
 K,67,-1000,1400,2.5
 !Diagonais 2 em z=2.5
 K,68,-1000,1400,2.5
 !Transversais
 K,69,0,1000,0
 K,70,1.5,1000,0
 K,71,3,1000,0
 K,72,4.5,1000,0
 K,73,6,1000,0
 K,74,7.5,1000,0
 K,75,9,1000,0
 K,76,10.5,1000,0
 K,77,12,1000,0
 K,78,13.5,1000,0
 K,79,15,1000,0
 K,80,16.5,1000,0
 K,81,18,1000,0

```

K,82,19.5,1000,0
K,83,21,1000,0
!
!Linhas
LSTR, 1, 16
LSTR, 1, 17
LSTR, 17, 3
LSTR, 3, 19
LSTR, 19, 5
LSTR, 5, 21
LSTR, 21, 7
LSTR, 7, 23
LSTR, 23, 9
LSTR, 9, 25
LSTR, 25, 11
LSTR, 11, 27
LSTR, 27, 13
LSTR, 13, 29
LSTR, 29, 15
LSTR, 15, 30
LSTR, 29, 14
LSTR, 13, 28
LSTR, 27, 12
LSTR, 11, 26
LSTR, 25, 10
LSTR, 9, 24
LSTR, 23, 8
LSTR, 7, 22
LSTR, 21, 6
LSTR, 5, 20
LSTR, 19, 4
LSTR, 3, 18
LSTR, 2, 17
LSTR, 16, 30
LSTR, 1, 15
ALLSEL,ALL
KSEL,S,LOC,Z,2.5
/VIEW,1,,,1
/ANG,1
/REP,FAST
LSTR, 31, 46
LSTR, 31, 47
LSTR, 47, 33
LSTR, 33, 49
LSTR, 49, 35
LSTR, 35, 51
LSTR, 51, 37
LSTR, 37, 53
LSTR, 53, 39
LSTR, 39, 55

```

```

LSTR, 55, 41
LSTR, 41, 57
LSTR, 57, 43
LSTR, 43, 59
LSTR, 59, 45
LSTR, 45, 60
LSTR, 44, 59
LSTR, 58, 43
LSTR, 42, 57
LSTR, 56, 41
LSTR, 40, 55
LSTR, 54, 39
LSTR, 38, 53
LSTR, 52, 37
LSTR, 36, 51
LSTR, 50, 35
LSTR, 34, 49
LSTR, 48, 33
LSTR, 32, 47
LSTR, 46, 60
LSTR, 31, 45
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
lplot
ALLSEL,ALL
KSEL,S,LOC,Y,0
/VIEW,1,,,-1
/ANG,1
/REP,FAST
kplot
LSTR, 1, 31
LSTR, 3, 33
LSTR, 5, 35
LSTR, 7, 37
LSTR, 9, 39
LSTR, 11, 41
LSTR, 13, 43
LSTR, 15, 45
ALLSEL,ALL
KSEL,S,LOC,Y,2.1
/VIEW,1,,1
/ANG,1
/REP,FAST
LSTR, 16, 46
LSTR, 17, 47
LSTR, 19, 49
LSTR, 21, 51
LSTR, 23, 53
LSTR, 25, 55

```

```

LSTR, 27, 57
LSTR, 29, 59
LSTR, 30, 60
ALLSEL,ALL
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
lplot
!Tamanho
LESIZE,ALL,0.5, , , , , ,1
!
!Banzos em z=0
LSEL,S,LOC,Y,0
LSEL,A,LOC,Y,2.1
LSEL,R,LOC,Z,0
LATT,1, ,1, , 61, ,2
LMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!
!Banzos em z=2.5
LSEL,S,LOC,Y,0
LSEL,A,LOC,Y,2.1
LSEL,R,LOC,Z,2.5
LATT,1, ,1, , 62, ,2
LMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!
!Montantes em z=0
LATT,1, ,1, , 63, ,1
LSEL,S,LOC,Z,0
FLST,2,15,4,ORDE,3
FITEM,2,1
FITEM,2,16
FITEM,2,-29
LMESH,P51X
ALLSEL,ALL
!
!Montantes em z=2,5
LATT,1, ,1, , 64, ,1
LSEL,S,LOC,Z,2.5
FLST,2,15,4,ORDE,3
FITEM,2,32
FITEM,2,47
FITEM,2,-60
LMESH,P51X
ALLSEL,ALL
!
!Diagonais 1 em z=0
LATT,1, ,1, , 65, ,1
LSEL,S,LOC,Z,0

```

```

FLST,2,7,4,ORDE,7
FITEM,2,2
FITEM,2,4
FITEM,2,6
FITEM,2,8
FITEM,2,10
FITEM,2,12
FITEM,2,14
LMESH,P51X
!Diagonais 2 em z=0
LATT,1,,1,,66,,1
FLST,2,7,4,ORDE,7
FITEM,2,3
FITEM,2,5
FITEM,2,7
FITEM,2,9
FITEM,2,11
FITEM,2,13
FITEM,2,15
LMESH,P51X
ALLSEL,ALL
!
!Diagonais 3 em z=2.5
LATT,1,,1,,67,,1
LSEL,S,LOC,Z,2.5
FLST,2,7,4,ORDE,7
FITEM,2,33
FITEM,2,35
FITEM,2,37
FITEM,2,39
FITEM,2,41
FITEM,2,43
FITEM,2,45
LMESH,P51X
!
!Diagonais 4 em z=2.5
LATT,1,,1,,68,,1
FLST,2,7,4,ORDE,7
FITEM,2,34
FITEM,2,36
FITEM,2,38
FITEM,2,40
FITEM,2,42
FITEM,2,44
FITEM,2,46
LMESH,P51X
ALLSEL,ALL
!
!Transversais
LATT,1,,1,,69,,2

```



```

FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,63
FITEM,2,71
LMESH,P51X
!
LATT,1,,1,, 70,,2
LMESH, 72
!
LATT,1,,1,, 71,,2
LMESH, 64
!
LATT,1,,1,, 72,,2
LMESH, 73
!
LATT,1,,1,, 73,,2
LMESH, 65
!
LATT,1,,1,, 74,,2
LMESH, 74
!
LATT,1,,1,, 75,,2
LMESH, 66
!
LATT,1,,1,, 76,,2
LMESH, 75
!
LATT,1,,1,, 77,,2
LMESH, 67
!
LATT,1,,1,, 78,,2
LMESH, 76
!
LATT,1,,1,, 79,,2
LMESH, 68
!
LATT,1,,1,, 80,,2
LMESH, 77
!
LATT,1,,1,, 81,,2
LMESH, 69
!
LATT,1,,1,, 82,,2
LMESH, 78
!
LATT,1,,1,, 83,,2
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,70
FITEM,2,79
LMESH,P51X
!!

```

```

ALLSEL,ALL
NUMMRG,NODE, , , ,LOW
NUMCMP,NODE
!!!
NUMMRG,KP, , , ,LOW
NUMCMP,KP
!Seleção de nós e aplicação das condições de contorno
FLST,2,4,3,ORDE,4
FITEM,2,1
FITEM,2,15
FITEM,2,31
FITEM,2,45
!*
/GO
DK,P51X, , , ,0,UX,UY,UZ, , , ,
ALLSEL,ALL
!
!Cargas
!Peso próprio da estrutura
ACEL,0,0.01,0,      !para que o peso fique em kN
LSWRITE,1
SAVE
!
!Peso elementos não estruturais
!
ACEL,0,0,0,
!
NSEL,S,LOC,X,0
NSEL,A,LOC,X,21
NSEL,R,LOC,Y,2.1
*GET,NUMNO,NODE,,COUNT
F,ALL,FY,-0.5625*2/NUMNO
ALLSEL,ALL
!
NSEL,S,LOC,X,1.5
NSEL,A,LOC,X,19.5
NSEL,R,LOC,Y,2.1
*GET,NUMNO,NODE,,COUNT
F,ALL,FY,-1.6875*2/NUMNO
ALLSEL,ALL
!
NSEL,S,LOC,X,0
NSEL,A,LOC,X,21
NSEL,R,LOC,Y,0
*GET,NUMNO,NODE,,COUNT
F,ALL,FY,-1.125*2/NUMNO
ALLSEL,ALL
!
NSEL,S,LOC,X,4.5
NSEL,A,LOC,X,7.5

```

```

NSEL,A,LOC,X,10.5
NSEL,A,LOC,X,13.5
NSEL,A,LOC,X,16.5
NSEL,R,LOC,Y,2.1
*GET,NUMNO,NODE,,COUNT
F,ALL,FY,-2.25*5/NUMNO
ALLSEL,ALL
!
NSEL,S,LOC,X,3
NSEL,A,LOC,X,6
NSEL,A,LOC,X,9
NSEL,A,LOC,X,12
NSEL,A,LOC,X,15
NSEL,A,LOC,X,18
NSEL,R,LOC,Y,0
*GET,NUMNO,NODE,,COUNT
F,ALL,FY,-2.25*6/NUMNO
ALLSEL,ALL
!
LSWRITE,2
SAVE
!Carga variável móvel
FDELETE,ALL,ALL
NSEL,S,LOC,X,0
NSEL,A,LOC,X,21
NSEL,R,LOC,Y,0
*GET,NUMNO,NODE,,COUNT
F,ALL,FY,-18.75*2/NUMNO
ALLSEL,ALL
!
NSEL,S,LOC,X,3
NSEL,A,LOC,X,6
NSEL,A,LOC,X,9
NSEL,A,LOC,X,12
NSEL,A,LOC,X,15
NSEL,A,LOC,X,18
NSEL,R,LOC,Y,0
*GET,NUMNO,NODE,,COUNT
F,ALL,FY,-37.5*6/NUMNO
ALLSEL,ALL
!
LSWRITE,3
SAVE
!Carga variável cobertura
FDELETE,ALL,ALL
NSEL,S,LOC,X,0
NSEL,A,LOC,X,21
NSEL,R,LOC,Y,2.1
*GET,NUMNO,NODE,,COUNT
F,ALL,FY,-0.46875*2/NUMNO

```

```

ALLSEL,ALL
!
NSEL,S,LOC,X,1.5
NSEL,A,LOC,X,19.5
NSEL,R,LOC,Y,2.1
*GET,NUMNO,NODE,,COUNT
F,ALL,FY,-1.40625*2/NUMNO
ALLSEL,ALL
!
NSEL,S,LOC,X,4.5
NSEL,A,LOC,X,7.5
NSEL,A,LOC,X,10.5
NSEL,A,LOC,X,13.5
NSEL,A,LOC,X,16.5
NSEL,R,LOC,Y,2.1
*GET,NUMNO,NODE,,COUNT
F,ALL,FY,-1.875*5/NUMNO
ALLSEL,ALL
LSWRITE,4
SAVE
!
!Carga variável de vento
FDELE,ALL,ALL
!
NSEL,S,LOC,Y,0
NSEL,A,LOC,Y,2.1
NSEL,R,LOC,Z,2.5
*GET,NUMNO,NODE,,COUNT
F,ALL,FZ,-19.652/NUMNO
ALLSEL,ALL
!
NSEL,S,LOC,X,0
NSEL,A,LOC,X,1.5
NSEL,A,LOC,X,3
NSEL,A,LOC,X,4.5
NSEL,A,LOC,X,6
NSEL,A,LOC,X,7.5
NSEL,A,LOC,X,9
NSEL,A,LOC,X,10.5
NSEL,A,LOC,X,12
NSEL,A,LOC,X,13.5
NSEL,A,LOC,X,15
NSEL,A,LOC,X,16.5
NSEL,A,LOC,X,18
NSEL,A,LOC,X,19.5
NSEL,A,LOC,X,21
NSEL,R,LOC,Z,2.5
NSEL,U,LOC,Y,0
NSEL,U,LOC,Y,2.1
*GET,NUMNO,NODE,,COUNT

```

```
F,ALL,FZ,-7.321/NUMNO
ALLSEL,ALL
!
NSEL,S,LOC,Z,2.5
NSEL,R,LOC,Y,.01,2.09
FLST,5,60,1,ORDE,24
FITEM,5,765
FITEM,5,-769
FITEM,5,776
FITEM,5,-780
FITEM,5,787
FITEM,5,-791
FITEM,5,798
FITEM,5,-802
FITEM,5,809
FITEM,5,-813
FITEM,5,820
FITEM,5,-824
FITEM,5,842
FITEM,5,-846
FITEM,5,853
FITEM,5,-857
FITEM,5,864
FITEM,5,-868
FITEM,5,875
FITEM,5,-879
FITEM,5,886
FITEM,5,-890
FITEM,5,897
FITEM,5,-901
NSEL,R,,P51X
CM,nosgrupo1,NODE
ALLSEL,ALL
!
NSEL,S,LOC,Z,2.5
NSEL,R,LOC,Y,.01,2.09
FLST,5,10,1,ORDE,4
FITEM,5,831
FITEM,5,-835
FITEM,5,908
FITEM,5,-912
NSEL,R,,P51X
CM,nosgrupo2,NODE
ALLSEL,ALL
CMSEL,S,NOSGRUPO1
CMSEL,A,NOSGRUPO2
*GET,NUMNO,NODE,,COUNT
F,ALL,FZ,-8.684/NUMNO
ALLSEL,ALL
LSWRITE,5
```

```

SAVE
!
!Carga excepcional
!
FDELE,ALL,ALL
NSEL,S,LOC,Z,2.5
NSEL,R,LOC,Y,0
NSEL,R,LOC,X,10.25,10.75
F,ALL,FZ,-100
ALLSEL,ALL
LSWRITE,6
SAVE
FDELE,ALL,ALL
!
!Solução
/sol
!ssolve,1,6,1
!
!Combinações de carga
/POST1
!COMBINAÇÃO 1
LCDEF,1,1
LCDEF,2,2
LCDEF,3,3
LCDEF,4,4
LCDEF,5,5
LCFACT,1,1.25!Peso próprio da estrutura
LCFACT,2,1.5 !Peso dos elementos não estruturais
LCFACT,3,1.5 !Carga móvel
LCFACT,4,1.5*0.5 !Carga da cobertura
LCFACT,5,1.4*0.6 !Carga de vento
LCZERO !Zera resultados
LCASE,1 !Cria uma combinação
LCOPER,ADD,2
LCOPER,ADD,3
LCOPER,ADD,4
LCOPER,ADD,5
LCWRITE,1
RAPPND,11
!
!COMBINAÇÃO 2
LCDEF,1,1
LCDEF,2,2
LCDEF,3,3
LCDEF,4,4
LCDEF,5,5
LCFACT,1,1.25!Peso próprio da estrutura
LCFACT,2,1.5 !Peso dos elementos não estruturais
LCFACT,3,1.5*0.6 !Carga móvel
LCFACT,4,1.5 !Carga da cobertura

```

```

LCFACT,5,1.4*0.6    !Carga de vento
LCZERO !Zera resultados
LCASE,1 !Cria uma combinação
LCOPER,ADD,2
LCOPER,ADD,3
LCOPER,ADD,4
LCOPER,ADD,5
LCWRITE,1
RAPPND,12
!
!COMBINAÇÃO 3
LCDEF,1,1
LCDEF,2,2
LCDEF,3,3
LCDEF,4,4
LCDEF,5,5
LCFACT,1,1.25 !Peso próprio da estrutura
LCFACT,2,1.5 !Peso dos elementos não estruturais
LCFACT,3,1.5*0.6 !Carga móvel
LCFACT,4,1.5*0.5 !Carga da cobertura
LCFACT,5,1.4 !Carga de vento
LCZERO !Zera resultados
LCASE,1 !Cria uma combinação
LCOPER,ADD,2
LCOPER,ADD,3
LCOPER,ADD,4
LCOPER,ADD,5
LCWRITE,1
RAPPND,13
!
!COMBINAÇÃO 4 (excepcional)
LCDEF,1,1
LCDEF,2,2
LCDEF,3,3
LCDEF,4,4
LCDEF,5,5
LCDEF,6,6
LCFACT,1,1.25 !Peso próprio da estrutura
LCFACT,2,1.5 !Peso dos elementos não estruturais
LCFACT,3,1.5*0.6 !Carga móvel
LCFACT,4,1.5*0.5 !Carga da cobertura
LCFACT,5,1.4*0.6 !Carga de vento
LCFACT,6,1 !Carga excepcional
LCZERO !Zera resultados
LCASE,1 !Cria uma combinação
LCOPER,ADD,2
LCOPER,ADD,3
LCOPER,ADD,4
LCOPER,ADD,5
LCOPER,ADD,6

```

```

LCWRITE,1
RAPPND,14
!
!COMBINAÇÃO 5 (estado limite serviço - deformações excessivas - quase
permanente)
LCDEF,1,1
LCDEF,2,2
LCDEF,3,3
LCDEF,4,4
LCDEF,5,5
LCFACT,1,1    !Peso próprio da estrutura
LCFACT,2,1    !Peso dos elementos não estruturais
LCFACT,3,0.3  !Carga móvel
LCFACT,4,0.3  !Carga da cobertura
LCFACT,5,0    !Carga de vento
LCZERO !Zera resultados
LCASE,1 !Cria uma combinação
LCOPER,ADD,2
LCOPER,ADD,3
LCOPER,ADD,4
LCOPER,ADD,5
LCWRITE,1
RAPPND,15
!
!VISUALIZAÇÃO
/SHRINK,0
/ESHAPE,1.0
/EFACET,1
/RATIO,1,1,1
/CFORMAT,32,0
/REPLOT
!!
!Extrair resultados
!Tensão devido a carga axial
AVPRIN,0,0,
ETABLE,tensaoax,SMISC, 31
!Deformação elástica no sentido da barra
AVPRIN,0,0,
ETABLE,defax,SMISC, 41
!Momento em z na barra
AVPRIN,0,0,
ETABLE,mz,SMISC, 3

```


APÊNDICE C – Planilhas do *Software* Excel

BANZO SUPERIOR								
VERIFICAÇÃO DE TENSÃO RESISTENTE DE COMPRESSÃO								
PERFIL								
AÇO ASTM A572			Fy	345	Mpa			
			E	200000	Mpa			
			Fu	450	Mpa			
						h	285,3	cm
						b	98,2	cm
h	292	mm	bf	101	mm	e	3,308	cm
tw	5,6	mm	tf	6,7	mm			
Ix	4346,00	cm ⁴	G	77000	Mpa			
Iy	116,00	cm ⁴	rx	11,89	cm			
It	4,650	cm ⁴	ry	1,94	cm			
			ro	12,05	cm			
						Aret =	3,24098	cm ²
Ag	30,7	cm ²	cw	25594,00	cm ⁶	Lef =	57,87	
					bef =	214,13	Aef =	27,46 cm ²
FATOR DE REDUÇÃO FLAMBAGEM LOCAL								
	MESAS	λ	Qs		ALMA	λ	Qa	Q
bf/tf	7,54	13,48 24,80	1,000	h/tw	48,57143	35,875	0,894	0,894
COMPRIMENTO DE FLAMBAGEM								
Lx	150	cm	Ly	150	cm	Lz	150	cm
FORÇA AXIAL FLAMBAGEM ELÁSTICA								
NEX	Flambagem por flexão em relação ao eixo principal de inércia X						3812737,84	kgf
NEY	Flambagem por flexão em relação ao eixo principal de inércia Y						101766,59	kgf
NEZ	Flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal Z						179377	kgf
NEYZ	Força normal de flambagem elástica por flexo-torção						101767	kgf
ÍNDICE DE ESBELTEZ REDUZIDO					λo=	0,9648		
FATOR DE REDUÇÃO RESIST. A COMPRESSÃO					x=	0,6773		
F. AXIAL DE COMP. RESIST. DE CÁLCULO					Nc, Rd=	58331	kgf	
FORÇA SOLICITANTE					Nc, Sd=	32890	kgf	
					56,39%	OK!		



UNIVATES

Rua Avelino Tallini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil

CEP 95900-000 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000

www.univates.br | 0800 7 07 08 09